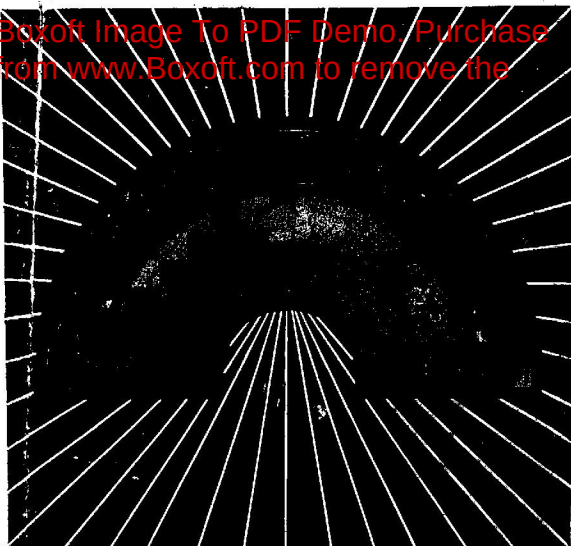


Boxoft Image To PDF Demo. Purchase
from www.Boxoft.com to remove the



Г. И. АШКЕНАЗИ

ЦВЕТ

В ПРИРОДЕ
И ТЕХНИКЕ.



Г. И. АШКЕНАЗИ

ЦВЕТ В ПРИРОДЕ И ТЕХНИКЕ

ТРЕТЬЕ, ПЕРЕРАБОТАННОЕ И ДОПОЛНЕННОЕ ИЗДАНИЕ



«ЭНЕРГИЯ»
МОСКВА 1974

6П2.19

А 98

УДК 535.6

ПУБЛИКАЦИОННАЯ
БИБЛИОТЕКА
МОСКОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
УНИВЕРСИТЕТА СССР

75-18522

45277

Ашкенази Г. И.

А 98 Цвет в природе и технике. Изд. 3-е, перераб. и доп. М., «Энергия», 1974.

88 с. с ил.

В книге в популярной форме рассказывается о физической природе цвета, его восприятии, определении, расчете и измерении. Дается представление о приборах для измерения цвета. Рассматриваются вопросы использования цвета на производстве при нормировании и определении сортности, в количественном химическом анализе и др. Описывается применение цвета в световой сигнализации, цветной фотографии и цветном кино, в полиграфии, цветном телевидении, на театральной сцене, в освещении и световом оформлении городов.

Книга рассчитана на широкий круг читателей, не имеющих специального технического образования и интересующихся вопросами, связанными с цветом и его применением.

А 30310-306
051(01)-73 178-74

6П2.19

© Издательство «Энергия», 1974 г.

ГЕНРИХ ИСААКОВИЧ АШКЕНАЗИ

ЦВЕТ В ПРИРОДЕ И ТЕХНИКЕ

Редактор М. П. Соколова

Обложка художника А. А. Иванова

Технический редактор Н. А. Галанчева

Корректор И. Д. Панина

Сдано в набор 22/X 1973 г. Подписано к печати 28/XI 1974 г. Т-20146

Формат 60×90^{1/16} Бумага типографская № 3 Усл. печ. л. 5,5 + 4 вкл.

Уч.-изд. л. 6,64 Тираж 18 000 экз. Зак. 464 Цена 40 коп.

Издательство «Энергия», Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10.

Московская типография № 10 Союзполиграфпрома
при Государственном комитете Совета Министров СССР
по делам издательства, полиграфии и книжной торговли.
Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10.

ВВЕДЕНИЕ

Велика роль света в жизни человека. Более того, невозможно представить себе жизнь без света. Все живые организмы и растения, окружающие нас, развиваются под животворным влиянием света и сопутствующих ему ультрафиолетовых (биологически активных) и инфракрасных (тепловых) излучений. Без света живые организмы и растения погибают.

Свет дает нам возможность видеть и изучать все окружающее нас на земле, а также многое находящееся вне земли в беспредельном мировом пространстве. Так, только наблюдая свет, излучаемый солнцем и звездами, мы можем судить об их температуре, скорости их движения, а также об их составе, т. е. о веществах, из которых они состоят.

Свет дает нам возможность проникать в тайны строения вещества. Благодаря свету при помощи оптических и электронных микроскопов было обнаружено клеточное строение растительных и животных организмов, были открыты бактерии и вирусы и изучены методы борьбы с ними.

Таким образом, с помощью света человек все глубже и глубже познает природу, все больше расширяет границы своего познания.

Мы ощущаем свет при помощи органа зрения — глаза. И ощущаем мы не только свет, но и цвет. Мы не только видим освещенные или светящиеся окружающие нас предметы, но и можем судить об их окраске.

Свойство глаза — не только видеть окружающие нас предметы и явления, но и ощущать их цвет — дает нам возможность наблюдать неисчерпаемые богатства красок природы и воспроизводить цвета, нужные нам в разных областях жизни и деятельности.

С точки зрения диалектического материализма первичным является излучение, как первичная материя, воздействующая на органы чувств, а ощущение света и цвета возникает в результате воздействия излучения на светочувствительные клетки глаза. Это положение диалектического материализма было с исчерпывающей полнотой сформулировано В. И. Лениным в его гениальном произведении «Материализм и эмпириокритицизм»: «Если цвет является ощущением лишь в зависимости от сетчатки (как вас заставляет признать естествознание), то, значит, лучи света, падая на сетчатку, производят ощущение цвета. Значит, вне нас, независимо от нас и от нашего сознания существует движение мате-

рии, скажем, волны эфира определенной длины и определенной быстроты, которые, действуя на сетчатку, производят в человеке ощущение того или иного цвета. Так именно естествознание и смотрит. Различные ощущения того или иного цвета оно объясняет различной длиной световых волн, существующих вне человеческой сетчатки, вне человека и независимо от него. Это и есть материализм: материя, действуя на наши органы чувств, производит ощущение. Ощущение зависит от мозга, нервов, сетчатки и т. д., то есть от определенным образом организованной материи. Существование материи не зависит от ощущения. Материя есть первичное. Ощущение, мысль, сознание есть высший продукт особым образом организованной материи»¹.

В книге «Материализм и эмпириокритицизм» имеются еще следующие высказывания, относящиеся к этому же вопросу... «цвет есть результат воздействия физического объекта на сетчатку = ощущение есть результат воздействия материи на наши органы чувств»². И далее: «Ибо раз вы признали, что источник света и световые волны существуют *независимо* от человека и от человеческого сознания, цвет зависит от действия этих волн на сетчатку, — то вы фактически встали на материалистическую точку зрения...»³.

Вопросам, связанным с цветом, его восприятием, определением и измерением, которыми занимается наука цветоведение, посвящена настоящая книга.

Цветоведение является сравнительно молодой наукой. Как наука цветоведение оформилось во второй половине XIX в., около 100 лет тому назад. С этого времени началось довольно быстрое развитие этой науки. В настоящее время цветоведение находит все большее и большее применение в светотехнике и других областях науки, в ряде отраслей промышленности, в сигнализации на всех видах транспорта и в искусстве.

Большую роль в развитии цветоведения сыграли русские ученые и особенно гениальный русский ученый М. В. Ломоносов заложивший основы этой науки.

С успехом работали и работают в области цветоведения советские ученые. Вопросами цветоведения в нашей стране занимается целый ряд научных учреждений, среди которых Государственный оптический институт им. С. И. Вавилова, Государственный научно-исследовательский институт глазных болезней им. Гельмгольца, Военно-медицинская академия им. С. М. Кирова, Всесоюзный научно-исследовательский светотехнический институт (ВНИСИ), Всесоюзный научно-исследовательский институт метрологии, Научно-исследовательский кинофотоинститут, Научно-исследовательская лаборатория цветового зрения Министерства путей сообщения, Государственный научно-исследовательский институт радио.

¹ В. И. Ленин. Полн. собр. соч. Изд. 5-е, т. 18, с. 50.

² Там же, стр. 52.

³ Там же, стр. 55.

СВЕТ

С начала существования человечества люди знали лишь естественный свет солнца, луны и звезд.

Настало время и люди научились самостоятельно добывать огонь. Костер был первым искусственным источником света и одновременно источником тепла. Тысячелетиями исчисляется время совершенствования искусственных источников света от костра до электрических источников света, которыми мы пользуемся в настоящее время.

Впервые электрический источник света был осуществлен выдающимся русским ученым акад. В. В. Петровым. В 1802 г. он открыл явление электрической дуги, образующейся между двумя угольными стержнями при прохождении по ним электрического тока.

Электрическая дуга, впервые осуществленная акад. В. В. Петровым, должна по праву называться дугой Петрова. Это открытие акад. Петрова послужило толчком к работам по созданию электрических источников света.

Выдающаяся роль в деле создания электрических источников света принадлежит талантливым русским изобретателям П. Н. Яблочкову, А. Н. Лодыгину и В. Н. Чиколеву.

Искусственные источники света прочно вошли в жизнь человека. Они дают возможность человеку не прекращать своей производственной и культурной деятельности в вечерние часы, когда отсутствует естественный (солнечный) свет.

Еще в древние времена, на заре возникновения научной мысли, возник вопрос о том, что такое свет. Древнегреческими учеными была высказана гипотеза о так называемых глазных лучах, исходящая из предположения, что глаза испускают лучи, которые ощупывают необходимые предметы, чтобы узнать их. Наличие свечения глаз у некоторых животных эти ученые считали доказательством существования глазных лучей.

Против существования глазных лучей уже в древней Греции высказывались такие ученые, как Аристотель и Демокрит, считавшие, что свет исходит из самих тел, которые мы видим.

Гипотеза о глазных лучах господствовала в течение многих столетий. Так, в XVI столетии французский ученый Декарт писал: «Подобно тому, как в темноте мы ощупываем перед собой пред-

мсты тростью, так днем мы ощупываем их лучами, исходящими из глаз».

Мы и сейчас иногда применяем выражения: «глаза сверкнули», «глаза сияют» и т. д., которые, очевидно, связаны с представлениями о природе света, существовавшими у древних народов.

В конце XVII столетия были предложены две теории, совершенно по-разному трактовавшие сущность и распространение света.



Рис. 1. Колебания веревки при ее раскачивании.

Теория Ньютона предлагала рассматривать луч света как поток материальных частиц — корпускул, которые излучаются светящимся телом и, попадая в глаз, вызывают ощущение света. Эта теория, носившая название корпускулярной, имела большое распространение.

Вторая теория, развитая Гюйгенсом, носившая название волновой теории света, исходила из того предположения, что вся Вселенная заполнена идеально упругой средой, называемой эфиром. С появлением в некоторой точке эфира источника света частицы эфира начинают совершать быстрые колебания. Эти колебания подобны тем, какие получаются при раскачивании веревки, привязанной одной своей стороной к неподвижному предмету (рис. 1). Являясь центром упругой деформации, каждая колеблющаяся частица эфира приводит в колебание соседнюю частицу, а последняя — следующую и т. д. Распространение этих колебаний в эфире и представляет собой луч света.

Каждая частица эфира на всем протяжении светового луча совершает колебания в плоскости, перпендикулярной распространению луча света. В каждый момент времени колеблющиеся частицы, совершающие колебания, располагаются так, что в совокупности образуют кривую линию, напоминающую собой ряд волн (рис. 2). В результате вдоль луча бегут волны, причем процесс их распространения совершается с колоссальной скоростью: 300 000 км в секунду.

Подобный процесс распространения волн, но, конечно, не с такой большой скоростью, можно наблюдать, если на поверхность неподвижной воды бросить какой-либо предмет, например щепку. От места ее падения во все стороны будут расходиться волны. Нам будет казаться, что волны бегут, но щепка, находящаяся на воде, будет совершать движение вверх и вниз, не сдвигаясь в стороны.

гаясь с места, и этим показывать направление колебания частиц воды.

В примерах с веревкой и водой мы наблюдаем колебания частиц веревки и воды, совершающиеся поперек движения волны; такие колебания называются поперечными. Согласно представлениям волновой теории света световые волны являются также поперечными.



Рис. 2. Колебания частиц, образующие ряд волн.

Следует указать на то, что существуют волны продольные, т. е. такие, когда колеблющиеся частицы совершают колебания вдоль направления движения волны — вперед и назад. К продольным колебаниям относятся, например, звуковые колебания.

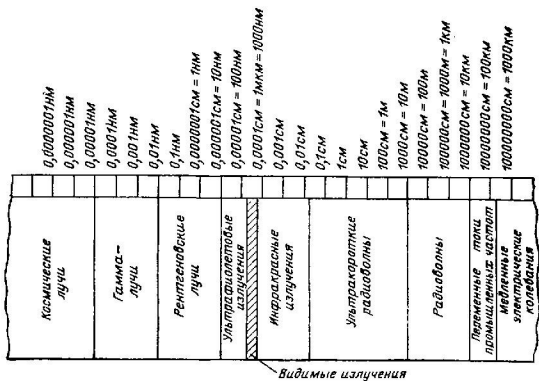


Рис. 3. Спектр электромагнитных колебаний.

Расстояние между двумя соседними вершинами или гребнями волн носит название длины волны. Длина волны выражается единицами длины — метрами, сантиметрами, миллиметрами, микрометрами.

Для измерения длин волн света пользуются единицей длины, называемой нанометр (нм). Один нанометр равен миллионной доле миллиметра ($1 \text{ нм} = 0,001 \text{ мкм} = 0,000001 \text{ мм}$).

Волновая теория света блестяще объяснила целый ряд необъяснимых до нее световых явлений и получила всеобщее признание, а корпускулярная теория была отвергнута.

В середине XIX столетия было доказано теоретически и экспериментально, что свет — это электромагнитные колебания, а не упругие поперечные колебания эфира, природа которого оставалась невыясненной. Согласно новой электромагнитной теории света, разработанной знаменитым английским физиком Максвеллом, свет представляет собой электромагнитные колебания, т. е. периодические изменения электрического и магнитного полей в пространстве. Энергия, распространяющаяся в виде электромагнитных колебаний, получила название лучистой энергии. Электромагнитная теория света установила, что различные виды лучистой энергии, такие как видимые, ультрафиолетовые и инфракрасные излучения солнца, звезд и искусственных источников света, радиоволны, рентгеновские лучи и т. д., имеют одинаковую природу и отличаются друг от друга лишь длиной волны. Скорость распространения всех видов лучистой энергии такая же, как и скорость распространения света, и составляет, как это было указано выше, 300 000 км в секунду.

Лучистая энергия солнца, звезд, искусственных источников света воздействует на светочувствительные элементы глаза и вызывает световые и цветовые ощущения. Лучистая энергия передающих радиостанций, рентгеновских трубок, ультрафиолетовых и инфракрасных излучений не вызывает у нас зрительных ощущений, но некоторые из них производят на организм человека иное действие. Ультрафиолетовые излучения вызывают покраснение кожи (эритема), а инфракрасные излучения — нагревание. В первом случае мы имеем дело с видимыми излучениями (светом), а во втором — с невидимыми излучениями.

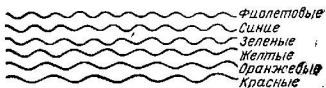
Различные виды лучистой энергии образуют спектр электромагнитных колебаний (рис. 3), из которого видно, что электромагнитные колебания могут иметь самые различные значения длины волны — от миллионных долей нанометра (космические лучи) до нескольких километров (излучение радиостанций; длинные волны).

Излучения, имеющие длины волн в пределах от 380 до 770 нм, действуя на глаз человека, вызывают у нас световые ощущения — это видимые излучения. Каждой длине волны видимого излучения соответствует свой цвет.

Таким образом, видимые излучения занимают ничтожную часть в спектре электромагнитных излучений. На рис. 4 графически представлены волны, соответствующие различным цветам при увеличении их размера приблизительно в 25 000 раз. Фиолетовые лучи имеют наименьшую длину волны, а красные — наибольшую.

Электромагнитная теория света не только разрешила ряд вопросов, которые не были решены волновой теорией света, но также предсказала ряд новых явлений, связанных с электромагнитными колебаниями. В 1900 г. знаменитым русским физиком П. Н. Лебедевым было обнаружено и измерено световое давление (давление света), предсказанное электромагнитной теорией света. Развитие электромагнитной теории привело к открытию радио в 1895 г. гениальным русским ученым-изобретателем А. С. Поповым.

Рис. 4. Схематическое изображение световых волн различных цветов (увеличение приблизительно в 25 000 раз).



Дальнейшее развитие физики привело к открытию ряда новых явлений, связанных со светом, которым электромагнитная теория света не смогла найти объяснения.

В XX столетии на основании ряда экспериментальных исследований выдающийся немецкий физик М. Планк пришел к мысли, что излучение и поглощение света происходят не непрерывно, как это полагали согласно волновой и электромагнитной теориям света, а отдельными порциями. Эти порции света получили наименование квантов света, или фотонов, а вся теория была названа квантовой теорией света. Согласно квантовой теории свет представляет собой совокупность мельчайших материальных частиц фотонов, движущихся с колоссальной скоростью (300 000 км в секунду) и несущих конечное количество энергии.

«Свет,—говорил выдающийся советский ученый акад. С. И. Вавилов,—одновременно обладает свойствами волн и частиц, но в целом это не волны и не частицы и не смесь того и другого. Наши привычные понятия не в состоянии полностью охватить реальность, у нас для этого еще не хватает сейчас ни слов, ни образов».

Для понимания дальнейших глав достаточно иметь представление о длине волны света, которая определяет его цвет.

Как естественные, так и искусственные источники света имеют определенную световую мощность, т. е. количество света, излучаемого ими в единицу времени. Световая мощность носит название светового потока, единицей которого является люмен (лм). Лампочка от карманного фонаря обладает световым потоком около 4 лм, осветительная лампа накаливания мощностью 100 Вт, 220 В — 1 000 лм, а люминесцентная лампа мощностью 80 Вт белого цвета типа ЛБ80-3 — 4 880 лм.

Чем больше светового потока излучает источник света на единицу мощности, тем более экономичным он является. Отношение светового потока источника света к его мощности носит название световой отдачи, и она выражается в люменах на ватт (лм/Вт). Приведенная выше лампа накаливания мощностью 100 Вт имеет

световую отдачу 10 лм/Вт, а люминесцентная лампа мощностью 80 Вт — 60 лм/Вт.

Поверхности или тела оказываются освещенными в результате того, что на них падает световой поток источников света. Степень освещения поверхности определяется освещенностью. Освещенность определяется отношением светового потока к площади поверхности, на которую он падает. Единицей освещенности является люкс (лк), являющийся освещенностью при равномерном освещении поверхности площадью в 1 м^2 световым потоком в 1 лм. Чем больше световой поток, приходящийся на единицу освещаемой поверхности, тем больше ее освещенность. Освещенность в плоскости земли в летний солнечный полдень составляет 100 000 лк, при полной луне в безоблачную ночь 0,2 лк, а в безлунную звездную ночь 0,002 лк.

ЦВЕТ

Вспомните одно из красивейших явлений природы — радугу. Дождь еще не совсем прошел, сквозь облака пробиваются лучи солнца, и на небе появляется огромная многоцветная дуга, цвета которой плавно переходят один в другой.

Смотря на радугу, невозможно указать границы отдельных цветов и можно назвать лишь несколько характерных участков, расположенных в следующем порядке сверху вниз: красный, оранжевый, желтый, желто-зеленый, голубой, синий и фиолетовый.

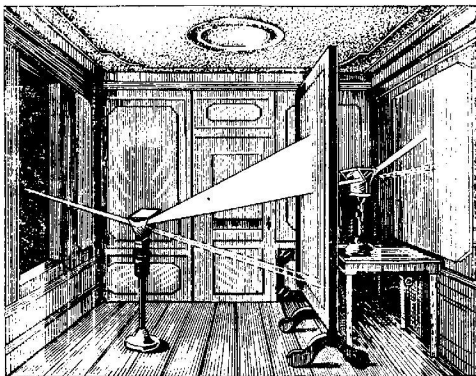


Рис. 5. Опыты по разложению света.

В действительности же каждый из указанных цветовых участков радуги в свою очередь состоит из множества цветовых оттенков, плавно переходящих один в другой. Свойства нашего глаза таковы, что в пределах каждого цветового участка мы отличаем друг от друга лишь ограниченное число цветов.

Очень долгое время ученые не могли объяснить причины появления радуги на небе. Первым, объяснившим это явление, был гениальный английский ученый Исаак Ньютон.

Ньютон искал ответ на интересовавший его вопрос в опытах с прохождением света через стеклянную трехгранную призму. Эти опыты состояли в следующем. Через маленькое круглое отверстие в ставне окна в затемненную комнату проникал луч света. На его пути Ньютон ставил стеклянную трехгранную призму (рис. 5). Пучок света преломлялся в призме, и на экране, стоявшем за призмой, появлялась разноцветная полоса (рис. 1). Последовательность расположения цветов в ней была такой же, как и в радуге.

Появление разноцветной полоски на экране при прохождении пучка света через стеклянную призму было известно и до Ньютона. Однако объяснение этому явлению давали совершенно неправильное. Считали, что указанное явление определяется влиянием стекла на проходящий через призму солнечный свет.

Цветную полоску Ньютон назвал спектром¹. После прохождения призмы луч света как бы ломается; он отклоняется от первоначального направления в сторону основания призмы (широкой ее части). Убирая призму, Ньютон получал на стене белый зайчик, причем размер зайчика был значительно меньше цветной полоски. При повороте призмы под разными углами к падающему свету на экране неизменно появлялся тот же спектр, и менялось лишь положение цветной полоски, связанное с положением призмы относительно падающего на нее света.

Тогда ученый поставил на пути света две призмы, но одну основанием кверху, а вторую книзу. На экране появился белый зайчик, а разложения света после прохождения двух призм не произошло.

Таким образом, Ньютон пришел к выводу, что белый свет есть свет сложный, составной, состоящий из множества цветных лучей. Цветные лучи, составляющие белый свет, по-разному преломляются при прохождении трехгранной призмы. Одни цветные лучи преломляются больше, другие меньше (рис. 1). В результате на экране получается разноцветная полоска. Однако ученый не остановился на сделанном, он продолжал опыты. На экране, на котором образовывался спектр при прохождении белого луча через призму, Ньютон сделал маленькое отверстие (рис. 5). Поворачивая призму вокруг ее оси, можно было сквозь это отверстие пропускать различные одноцветные лучи — фиолетовые, синие, голубые и т. д. За этим отверстием он поставил вторую призму и убедился в том,

¹ Спектро — «смотрю» (греч.).

что проходящие через нее цветные лучи, хотя и изменяют несколько свое направление, но не меняют своего цвета. Исходя из этого, Ньютон сделал вывод, что цветные лучи, из которых состоит белый свет, не являются сложными, поэтому не разлагаются на составные части. Эти лучи монохроматические¹ — простые, состоящие только из одного цвета. Он писал: «Лучи, различно преломляемые, дают различные цвета, наиболее преломляемые — пурпуровый или фиолетовый цвет, а наименее преломляемые — красный, средние — зелень или, лучше, границу зеленого и зеленовато-синего, синий находится между пурпуровым и зеленью, желтый между зеленью и красным. По сему лучи, преломляемые все более и более, располагаются в такой порядок: лучи, порождающие красный, желтый, зеленый, синий и фиолетовый со всеми последовательными ступенями и промежуточными цветами». И дальше: «Цвет белый и черный, а также пепельный или более темные промежуточные цвета создаются беспорядочным смешением лучей всякого рода»².

Разрешив указанные вопросы, Ньютон, по существу, дал объяснение появлению радуги. Лучи солнца преломляются в дождевых каплях, как в призмах, и белый свет раскладывается на составные части. В результате мы видим радугу, состоящую из множества спектральных цветов, переходящих один в другой.

Радуга является спектром солнечного света. Если бы мы через трехгранную призму пропустили свет обычной электрической лампы накаливания, то убедились бы в том, что спектр лампы накаливания похож на спектр солнечных лучей. Все накаливаемые тела дают спектр одного и того же вида. Переход от одного цвета к другому происходит непрерывно, поэтому такой спектр называют непрерывным.

В табл. 1 приведены ориентировочные границы участков наиболее характерных цветов непрерывного спектра.

Таблица 1

Границы участков характерных цветов непрерывного спектра

Границы участков, нм	Цвет	Границы участков, нм	Цвет
770—620	Красный	550—510	Зеленый
620—585	Оранжевый	510—480	Голубой
585—575	Желтый	480—450	Синий
575—550	Желто-зеленый	450—380	Фиолетовый

Весь спектр можно разделить по цветовым оттенкам на две части. В одну часть входят красные, оранжевые, желтые и желто-зеленые цвета, а в другую — фиолетовые, синие, голубые и зеле-

¹ Моно — «одно», хрома — «цвет» (греч.), монохроматический — одноцветный.

² Исаак Ньютон. Лекции по оптике, с. 144, 145. Перевод, комментарии и редакция акад. С. И. Вавилова. Изд-во АН СССР, 1946.

ные цвета. Цвета первой части спектра связываются у нас с представлением о цвете нагретых тел — огня, поэтому их называют теплыми цветами. Цвета второй части спектра связываются у нас с цветом воды, льда, металла и называются холодными цветами.

Натриевая газоразрядная (лампа, в которой при прохождении через нее электрического тока происходит свечение паров металла натрия) и ртутная газоразрядная лампы имеют отличный от лампы накаливания и солнечного света спектр. При прохождении света натриевой лампы через призму на экране появляется узкая желтая полоска — желтая линия, а ртутная лампа дает несколько линий разного цвета — фиолетовую, синюю, зеленую и желтую. Такие спектры носят название линейчатых, так как состоят из цветных линий.

Натриевая лампа излучает монохроматический лучистый поток (лучистым потоком называют мощность лучистой энергии), т. е. ее лучистый поток имеет практически одну длину волны. В результате в ее спектре имеется линия одного цвета. Ртутная лампа излучает немонохроматический — сложный лучистый поток, так как в ее спектре имеется несколько монохроматических излучений.

Существуют приборы, с помощью которых можно измерять лучистый поток источников света в абсолютных величинах (в ваттах) для различных длин волн их спектра. Такие приборы называются спектрографами, в них лучистый поток исследуемого источника света проходит через трехгранную призму, раскладывается в спектр и фотографируется на пластинку, установленную в специальной кассете. По почернению различных мест пластинки судят о величинах лучистого потока разных длин волн данного источника света. На основании полученных данных можно построить в системе прямоугольных координат весьма наглядный график зависимости лучистого потока от длины волны. Лучистый поток откладывают по оси ординат, а длины волн — по оси абсцисс. Такой график называют распределением лучистого потока в спектре источника света.

Для источников света с непрерывным спектром такой график представляет собой кривую линию, а для источников света с линейчатым спектром ряд ординат, соответствующих тем длинам волн, которые излучает источник с линейчатым спектром. На рис. 6 приведено относительное распределение лучистого потока в спектрах натриевой лампы, ртутной лампы высокого давления, лампы накаливания и естественного солнечного света в пределах видимой области спектра. Максимальное значение монохроматического лучистого потока принято во всех кривых за 100%, остальные же значения определены относительно максимального. Из приведенных данных спектрального распределения лучистого потока видно, что натриевая лампа излучает только желтый свет с длиной волны 589,3 нм, а ртутная лампа высокого давления излучает различные длины волн в фиолетовой, синей, зеленой и желтой частях видимой области спектра. Лампа накаливания излучает все длины волн видимой области спектра, однако коротковолновых

фиолетовых и синих излучений в ее спектре значительно меньше, чем красных и желтых. В спектре солнечного света излучения всех длин волны видимой области спектра распределены более или менее равномерно.

Спектральный состав лучистого потока источника света определяет цвет его излучения.

Чем же определяется цвет окружающих нас предметов? Какой физический смысл соответствует нашим представлениям о том, что трава зеленая, ткань синяя, краска красная, небо голубое и т. д.?

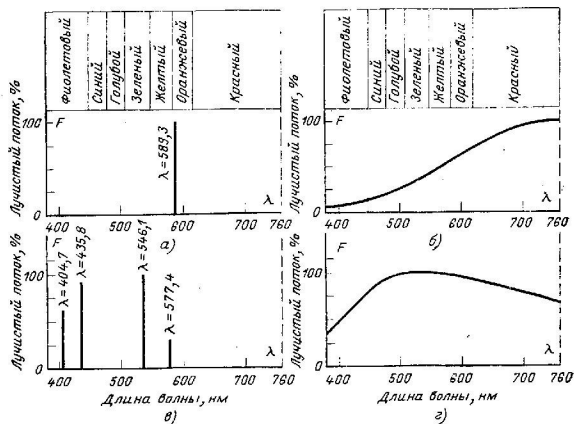


Рис. 6. Распределение лучистого потока в спектрах натриевой газоразрядной лампы (а), лампы накаливания (б), ртутной газоразрядной лампы высокого давления (в) и прямого солнечного света (г).

Пусть на какое-нибудь просвечивающее тело падает световой поток источника света с непрерывным спектром. Часть этого светового потока отразится от поверхности тела, часть его пройдет через тело и часть поглотится им. Отношения отраженного и пропущенного телом световых потоков к падающему световому потоку носят название общих или суммарных коэффициентов отражения и пропускания и выражаются в процентах. Для непросвечивающего тела коэффициент пропускания равен нулю, а для белого прозрачного стекла коэффициент отражения очень мал. Так, например, свежесвыпавший снег имеет коэффициент отражения 85%, белая бумага 75%, черная кожа 1—2%. Это означает, что снег отражает 85%, белая бумага 75%, а черная кожа 1—2%

падающего на них светового потока. Оконное стекло имеет коэффициент пропускания 92%, а рассеивающее молочное стекло около 50%.

Общие коэффициенты отражения и пропускания характеризуют способность тела отражать и пропускать свет источника излучения с непрерывным спектром. Очень важно знать степень отражения и пропускания телом монохроматических лучей разных длин волн. Будем освещать какое-либо тело монохроматическим светом разных длин волн в пределах от 770 (красный свет) до 380 нм (фиолетовый свет). Часть монохроматического света отра-

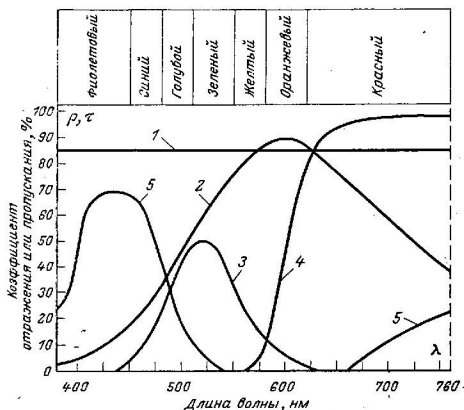


Рис. 7. Кривые спектрального отражения поверхности свежесыпавшего снега (1), желтой бумаги (2) и кривые спектрального пропускания зеленого светофильтра (3), красного светофильтра (4), синего светофильтра (5).

зится от освещаемой поверхности тела, часть пройдет через тело и часть поглотится им. Отношение монохроматического светового потока данной длины волны, отраженного телом, к монохроматическому световому потоку, освещающему тело, носит название спектрального коэффициента отражения. Соответственно отношение монохроматического светового потока, пропущенного телом, к монохроматическому световому потоку, освещающему его, даст спектральный коэффициент пропускания. Спектральные коэффициенты отражения и пропускания выражаются в процентах.

Нанесем значения спектральных коэффициентов отражения и пропускания среды в системе прямоугольных координат, причем по оси абсцисс будем откладывать значения длин волн, а по оси

ординат — соответствующие этим длинам волн спектральные коэффициенты отражения или пропускания в процентах. В результате мы получим кривые, которые носят название кривых спектрального отражения или пропускания и характеризуют способность тела или среды отражать или пропускать свет разных длин волн.

На рис. 7 представлены кривые спектрального отражения свежеснеженного снега, желтой бумаги и пропускания зеленого, синего и красного светофильтров (цветное стекло). Эти кривые показывают, что поверхность свежеснеженного снега одинаково отражает излучения всех длин волн света, желтая бумага хорошо отражает желтые и оранжевые лучи, несколько хуже зеленые и красные и совсем мало синие и фиолетовые лучи. Зеленый светофильтр хорошо пропускает только зеленые излучения, хуже голубые и желтые и почти не пропускает остальные. Красный светофильтр хорошо пропускает красные лучи, несколько хуже оранжевые и желтые и не пропускает остальные лучи. Синий светофильтр хорошо пропускает синие и фиолетовые лучи, несколько хуже голубые и красные лучи и не пропускает остальные.

Если тело или среда отражают или пропускают световой поток так, что спектральные коэффициенты отражения или пропускания для всех длин волн видимой области спектра одинаковы, говорят, что тело или среда неизбирательно отражают или пропускают световой поток. Такие тела или среды не изменяют при отражении или пропускании света соотношения между излучениями различных длин волн. Для этих тел и сред кривые спектрального отражения или пропускания представляют собой горизонтальные прямые линии (см. кривую для свежеснеженного снега). Если же отражение или пропускание тела или среды неодинаково для различных длин волн видимой области спектра, то такое отражение или пропускание является избирательным, т. е. некоторые монохроматические лучи отражаются или пропускаются больше, чем другие.

Если мы поверхность чертежной бумаги, неизбирательно отражающую свет, осветим белым солнечным светом, то она нам будет представляться белой. Поверхность чертежной бумаги, освещенная светом натриевой лампы, представится нам желтой. Поверхности, не изменяющие спектрального состава падающего на них света и имеющие коэффициент отражения не менее 85%, называются белыми (снег). Тела или среды, через которые световой поток проходит без изменения его спектрального состава, называются бесцветными. К бесцветным телам относится, например, прозрачное оконное стекло.

Поверхность, покрытая киноварью (краска), освещенная белым солнечным светом, представляется нам красной.

Если мы смотрим через синий светофильтр (синее стекло) на светящуюся нить лампы накаливания, то последняя представляется нам синего цвета.

Это означает, что поверхность, покрытую киноварью, мы потому и видим красной, что она хорошо отражает красные, оранже-

вые и желтые лучи и плохо все остальные. Смотря через синий светофильтр на светящуюся нить лампы накаливания, мы видим последнюю синей потому, что синий светофильтр из всей совокупности излучений лампы накаливания пропускает только синие, фиолетовые и голубые излучения, которые в результате вызывают у нас ощущение синего цвета. Тела и среды, которые неодинаково отражают или пропускают свет разных длин волн, имеют при освещении белым светом ту или иную окраску, соответствующую их физическим свойствам, и называются цветными.

Теперь мы можем ответить на поставленный вопрос. Цвет предметов, окружающих нас, зависит, во-первых, от их способности отражать или пропускать падающий на них световой поток и, во-вторых, от распределения лучистого потока в спектре освещающего их источника света. Первое положение мы уже подтверждали рядом примеров. Для подтверждения второго положения можно привести следующие примеры. Будем освещать зеленую ткань сначала ртутной лампой, а затем неоновой лампой, применяемой на практике для световой рекламы, имеющей в спектре преимущественно красные излучения. Зеленая ткань имеет кривую спектрального отражения, показанную на рис. 8, из которой видно, что эта ткань хорошо отражает зеленые и желтые излучения и значительно хуже синие и красные. В спектре ртутной лампы имеются преимущественно зеленые и желтые излучения, следовательно, взятая нами материя будет их хорошо отражать, и мы увидим яркую поверхность приятного зеленого цвета. При освещении этой же самой ткани неоновой лампой мы увидим темную бурого цвета поверхность, так как те излучения, которые имеются в спектре этой лампы, плохо отражаются зеленой тканью.

Всем известно, что окраска комнаты и находящихся в ней предметов воспринимается нами по-разному при дневном (естественном) освещении и при вечернем (искусственном) освещении, осуществляемом лампами накаливания. Причина этого — различное распределение лучистого потока в спектрах дневного света и лампы накаливания, наличие в спектре дневного света всех видимых излучений почти в равном количестве и почти полное отсутствие синих и фиолетовых излучений в спектре лампы накаливания. При освещении лампами накаливания цвета претерпевают сле-

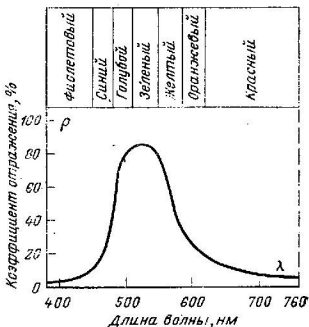


Рис. 8. Кривая спектрального отражения зеленой ткани.

дующие изменения по сравнению с освещением дневным светом. Красные цвета становятся более чистыми, а оранжевые краснеют. При этом и красные, и оранжевые цвета становятся более светлыми. Голубые цвета зеленеют, а синие и фиолетовые несколько краснеют, приобретают при этом пурпурный оттенок и значительно темнеют.

Когда мы говорим, что поверхность имеет зеленый цвет (при освещении белым светом), то это означает, что из всей совокупности излучений, составляющих белый свет, данная поверхность отражает преимущественно зеленые излучения. Отраженные поверхностью излучения воздействуют на наш глаз, и у нас создается ощущение зеленого цвета.

Среда (стекло, жидкость), представляющаяся нам окрашенной в зеленый цвет (при освещении белым светом), пропускает из всей совокупности излучений, составляющих белый свет, преимущественно зеленые излучения. На рис. II приведены схемы образования окраски предметов.

Все цвета, встречающиеся в природе, разделяются на ахроматические и хроматические. К ахроматическим цветам относятся белый, черный и серые цвета, являющиеся промежуточными между белым и черным цветами. Ахроматические цвета в спектре отсутствуют — они бесцветны. Тела и среды, имеющие неизбирательное отражение или пропускание, имеют ахроматический цвет при освещении дневным светом. К белым цветам при указанном освещении относится цвет белой бумаги, гипса, алебаstra, свежевыпавшего снега. Серый цвет имеют низкие сорта бумаги, разбавленная в воде тушь, загрязненный снег. Сажа, черная тушь, черный бархат имеют черный цвет.

Если смешивать сажу с мелом в разных пропорциях, то получатся серые цвета различной светлоты. Все серые цвета могут быть получены смешением черного и белого цветов, взятых в разных пропорциях.

Чем же отличаются друг от друга ахроматические цвета? Все тела, имеющие ахроматический цвет, в разной степени количественно отражают свет. Они обладают различными коэффициентами отражения, но качественно отражают свет одинаково — неизбирательно, т. е. в равной степени для всех длин волн видимой области спектра. При одинаковом освещении поверхность черной кожи представляется нам значительно более темной, чем поверхность белых стен и белой бумаги, так как последние обладают значительно большими коэффициентами отражения. Чем больший коэффициент отражения имеет неизбирательно отражающая поверхность, тем более светлой она кажется. Наибольшим коэффициентом отражения обладает окись магния (порошок белого цвета), она отражает 96% падающего на нее светового потока, а наименьшим — черный бархат, он отражает только 0,3% падающего на него света. Таким образом, среди существующих материалов окись магния является самым светлым, а черный бархат самым темным.

Поскольку ахроматические цвета присущи телам и средам с неизбирательным отражением или пропусканием, имеющим различные значения коэффициента отражения или пропускания, то в природе имеется бесчисленное их количество. Однако глаз человека способен отличить друг от друга лишь ограниченное их число — около трехсот ахроматических цветов, от белого до черного.

Хроматическими цветами являются все цвета, кроме ахроматических — это цвета, имеющие тот или иной цветовой оттенок. К хроматическим цветам, например, относятся все спектральные цвета. Наименования хроматических цветов, приведенные в табл. 1, являются неточным их определением, так как все они охватывают собой целые области цветов, а цвета внутри каждой области различаются между собой. Кроме того, само разграничение спектра на области является условным, так как зависит от индивидуальных особенностей глаза. Для более точного определения цвета нужны другие критерии.

Представим себе, что из спектра излучения мощной лампы накаливания выделен монохроматический зеленый свет с длиной волны 530 нм. Направим этот спектральный зеленый свет на непрозрачный белый экран. Экран окажется окрашенным в спектральный зеленый цвет. Направим на этот же экран лучок белого света. В этом случае экран так же, как и сначала (при отсутствии пучка белого света), будет окрашен в зеленый цвет, но этот зеленый цвет является более бледным, более белесым, чем спектральный зеленый цвет с длиной волны 530 нм. По мере прибавления все большего количества белого света (при постоянстве количества спектрального зеленого света) окраска экрана будет все более белесой, более бледной. Когда количество белого света, освещающего экран, будет намного больше количества спектрального зеленого света, окраска экрана будет представляться нам белой, бесцветной.

Таким образом, прибавляя к спектральному зеленому свету все большее количество белого света, мы получаем множество зеленых цветов одного тона, но различных по степени разбавления их белым светом. Все получавшиеся зеленые цвета явились результатом разбавления спектрального зеленого света с длиной волны 530 нм белым светом, поэтому могут характеризоваться этой длиной волны. Длина волны спектрального цвета, который при разбавлении белым светом дает данный цвет, носит наименование цветового тона. Цветовой тон обозначается греческой буквой λ (лямбда) и выражается в нанометрах. Следовательно, все зеленые цвета, в которые был окрашен белый экран, имели цветовой тон $\lambda = 530$ нм. Количество цветов одного и того же цветового тона безгранично, поскольку безгранична возможность прибавления разного количества белого света к данному спектральному цвету.

Примером цветов одного и того же цветового тона являются цвета ткани, выставленной на солнце и находящейся в течение

различного времени под воздействием его лучей. Под воздействием солнечных лучей окрашенная ткань выцветает, причем выцветание ее тем больше, чем большее время на нее воздействуют лучи солнца. Выцветание ткани приводит к тому, что она становится все более белесой и в конце концов может совсем обесцветиться. Подобный же результат можно получить, если какую-либо хроматическую краску разбавлять ахроматической белой краской. Чем больше белой краски мы добавляем, тем более белесым становится суммарный цвет. Таким образом, выцветание ткани на солнце подобно по своему действию разбавлению хроматического цвета белым цветом. Как в случае выцветания ткани, так и при разбавлении хроматической краски белой краской цветовой тон цвета ткани и краски не изменяется, но они становятся более белесыми. Из сказанного выше следует, что один цветовой тон не характеризует полностью цвета. Надо как-то учесть степень разбавления хроматического цвета белым, т. е. степень его белесости по отношению к спектральному цвету. В спектральных цветах нет примеси белого — они являются самыми чистыми цветами. Характеристику цвета, которая учитывает степень разбавления спектрального цвета белым для получения данного цвета, называют чистотой цвета и обозначают буквой p .

Предположим, что для получения некоторого цвета нам пришлось смешать 40 единиц светового потока спектрального цвета с цветовым тоном $\lambda = 500$ нм и 60 единиц светового потока белого света. В этом случае цвет смеси характеризуется 100 единицами светового потока. Чистота цвета определяется долей участия спектрального цвета в цвете смеси. В приведенном примере чистота цвета равна $40/(40+60) = 0,4 = 40\%$. Чистота цвета выражается в долях единицы или процентах. Спектральные цвета имеют чистоту цвета, равную 100%, т. е. никакой примеси белого не имеют. С прибавлением к спектральному цвету белого ахроматического цвета мы будем получать все более бледные цвета того же цветового тона. Их чистота по мере прибавления все большего количества белого цвета будет уменьшаться, а в конце концов мы получим цвет, чистота которого почти равна нулю, т. е. цвет, очень близкий к белому цвету. Если в указанной смеси уменьшить долю зеленого цвета до нуля, то получим ахроматический белый цвет, чистота которого равна нулю, как это следует из определения чистоты цвета. Следовательно, все ахроматические цвета имеют чистоту цвета, равную нулю. Натриевая газоразрядная лампа, излучающая монохроматический желтый свет, имеет цветовой тон $\lambda = 589,3$ нм и чистоту цвета $p = 100\%$. Ртутная лампа высокого давления, распределение лучистого потока в спектре которой представлено на рис. 6, имеет цветовой тон $\lambda = 489$ нм и чистоту цвета $p = 28\%$. Это означает, что для получения цвета, совпадающего с цветом излучения ртутной лампы, нужно смешать 28% спектрального цвета с цветовым тоном $\lambda = 489$ нм и 72% белого.

Цветовой тон λ и чистота цвета p характеризуют качество цвета. Совокупность цветового тона и чистоты цвета, т. е. качествен-

ная характеристика цвета, носит название цветности. Но и цветность, являясь качественной характеристикой цвета, не характеризует его полностью.

Пусть лист бумаги, выкрашенный в любой цвет, освещается прямым солнечным светом. Заслоним каким-либо белым непрозрачным предметом половину листа бумаги от прямых солнечных лучей. Одна часть листа бумаги будет затенена, и яркость ее будет меньше, чем второй ее части. И хотя обе половины листа бумаги, затененная и незатененная, одинаково отражают свет, т. е. качественно одинаковы, но цвет их различен. Различие состоит в том, что яркости обеих частей бумаги неодинаковы, в результате чего у нас возникают различные ощущения.

Так, розовый цвет при малых яркостях будет нам представляться цвета бордо, желтый — коричневым, а голубой — синим. Для оценки цвета необходимо указывать, кроме цветности, и его яркость, т. е. количественную его характеристику.

Итак, цвет может быть однозначно охарактеризован тремя величинами: цветовым тоном λ , чистотой цвета p , составляющими качественную характеристику цвета, и яркостью B , являющейся количественной его характеристикой. Два цвета тождественны, если они имеют одинаковую цветность и одинаковую яркость.

СМЕШЕНИЕ ЦВЕТОВ

Спектральные цвета являются самыми чистыми цветами, которые нам приходится наблюдать, так как в них отсутствует примесь белого цвета. Однако они не исчерпывают существующего в природе разнообразия цветов. В спектре, как мы говорили, нет белых, черных и серых цветов, а также цветов, получающихся смешением в разных пропорциях спектральных и белого цветов. Кроме того, в спектре отсутствуют малиновый, вишневый и сиреневый цвета, называемые пурпурными. Полный набор встречающихся в природе цветов может быть получен при смешении спектральных цветов между собой в различной пропорции, а также смешением спектральных цветов с ахроматическими (белым и серыми).

Под смешением цветов понимают явление образования новых цветов путем составления их из двух или нескольких других цветов.

Вспомним опыт Ньютона, когда он с помощью трехгранной стеклянной призмы сначала разложил солнечный свет на его составные части, а затем при помощи второй призмы снова получил белый свет. И этот опыт, и многие другие показывают, что независимо от того, какие цвета составляют данный ахроматический или хроматический цвет, глаз человека не обладает способностью анализировать цвет, т. е. определять без приборов, из каких составных частей этот цвет состоит. Именно поэтому любое видимое излучение, состоящее из сколь угодно большого числа составляю-

щих его излучений, может быть охарактеризовано одним цветом, для которого может быть указан цветовой тон.

Ахроматические цвета при смешении образуют также ахроматические цвета. Так, при смешении сажи с мелом в различных пропорциях получаются всевозможные серые цвета.

Спектральные цвета при смешении, как правило, не образуют спектральных цветов. Это означает, что для большинства цветов, полученных смешением каких-либо двух спектральных, чистота цвета будет меньше 100% ($p < 100\%$). Так, например, два спектральных цвета, один из которых синий с цветовым тоном $\lambda = 470$ нм и $p = 100\%$, а второй зеленый с цветовым тоном $\lambda = 540$ нм и $p = 100\%$, при смешении в некоторой пропорции образуют голубой цвет с цветовым тоном $\lambda = 498$ нм и чистотой $p = 63\%$. Исключение составляют спектральные цвета на участке спектра от $\lambda = 700$ нм (красный цвет) до $\lambda = 575$ нм (желтый цвет). Спектральные цвета этого участка видимого спектра при смешении образуют цвета, имеющие чистоту цвета, равную 100% ($p = 100\%$), т. е. также спектральные цвета. В частности, при смешении красного и желтого цветов, имеющих цветовой тон соответственно $\lambda = 660$ нм и 575 нм, взятых почти в равной пропорции, образуется спектральный красно-оранжевый цвет с цветовым тоном $\lambda = 610$ нм ($p = 100\%$). Из приведенных примеров видно, что два излучения, имеющие разный спектральный состав, способны производить одинаковое цветовое ощущение. В самом деле, излучение с длиной волны 575 нм создает ощущение желтого цвета, излучение с длиной волны 660 нм создает ощущение красного цвета, а в смеси при определенной пропорции они создают ощущение, тождественное с монохроматическим красно-оранжевым цветом с длиной волны 610 нм. Если изменим несколько пропорцию, в которой смешаны красный и желтый цвета, то в результате получим также спектральный цвет, но уже другой длины волны λ . Если увеличивать количество красного и уменьшать количество желтого цветов в смеси, оставляя яркость смеси неизменной, то цвет смеси будет все больше приближаться к красному цвету и в конце концов будет неотличим от него.

Многочисленными опытами установлено, что некоторые пары хроматических цветов, смешанные в определенной пропорции, образуют ахроматический цвет.

Два цвета, образующих при смешении ахроматический цвет, называются дополнительными. В природе существует бесчисленное количество пар дополнительных цветов, в том числе и спектральных.

В табл. 2 указаны ориентировочно названия взаимно дополнительных цветов. Дополнительными цветами являются: красный и голубой, зеленый и пурпурный, синий и желтый и т. д.

Факт существования дополнительных цветов может быть доказан следующим образом. Разложим в спектр при помощи стеклянной призмы излучение мощной лампы накаливания. На экране получим непрерывный спектр, в котором цвета переходят плавно

от одного к другому. Удалим каким-либо оптическим методом из полученного спектра излучения лампы накаливания излучение оранжевого цвета, а все остальные лучи соберем с помощью второй призмы на белый экран. На экране мы не получим белого цвета. Цвет смеси будет голубым, так как в этой смеси отсутствует оранжевый цвет. Следовательно, голубой и оранжевый цвета являются дополнительными, так как в совокупности они дают белый цвет. Если мы выделим из спектра лампы накаливания какой-либо спектральный голубой цвет, то соответственно сможем практически найти некоторый спектральный красный цвет, дополнительный взятому голубому.

Таблица 2

Спектральные участки взаимно дополнительных цветов

Один из дополнительных цветов	Второй из дополнительных цветов
Красный	Голубой
Оранжевый	Голубой
Желтый	Синий или голубой
Желто-зеленый	Пурпурный
Зеленый	Пурпурный
Голубой	Красный или пурпурный
Синий	Желтый
Фиолетовый	Желто-зеленый

Если проделать то же для других цветов спектра, то для каждого из них найдем дополнительный цвет. Отсутствующие в спектре пурпурные цвета также имеют дополнительные цвета.

В табл. 2 указаны только участки взаимно дополнительных цветов. Так, желтый цвет имеет в качестве дополнительного синий или голубой, а голубой — красный или пурпурный цвета. Это следует из того, что каждый из указанных цветов обнимает целую область длин волн, а для цветов, примыкающих к границам желтого и голубого цветов дополнительные цвета различны. Однако дополнительные цвета могут быть охарактеризованы и более точно. Пусть имеем какой-либо цвет, для которого известен цветовой тон λ_1 . Этому цвету соответствует определенный дополнительный цвет с цветовым тоном λ_2 . Таким образом, взаимно дополнительные цвета могут быть указаны длинами волн. Так, для синего цвета с длиной волны $\lambda=450$ нм дополнительным является желто-зеленый цвет с длиной волны $\lambda=570$ нм, для красного цвета с длиной волны $\lambda=680$ нм — голубой цвет с длиной волны $\lambda=495$ нм и т. д.

Из табл. 2 видно, что если один из двух дополнительных цветов относится к теплым, то другой к холодным цветам. Это совершенно понятно, так как в составе теплых цветов почти отсутствуют синий и голубые, а в холодных — красные и оранжевые излучения. В белом же присутствуют и теплые, и холодные цвета.

Пурпурные цвета, о которых было упомянуто в начале раздела, представляют собой результат смешения в разной пропорции красных и фиолетовых или синих цветов. Если в смеси преобладают фиолетовый или синий цвета над красным, мы получаем сиреневые и вишневые цвета. В противоположном случае, когда красный цвет преобладает в смеси над фиолетовым или синим цветами, получаются малиновые тона.

Поскольку пурпурные цвета отсутствуют в спектре, они не могут быть охарактеризованы цветовым тоном. Поэтому разные пурпурные цвета обозначаются длинами волны соответствующих им дополнительных цветов. В этом случае значения длин волны дополнительных цветов снабжают значком штрих. Так, например, цвет с обозначением $\lambda=540'$ нм означает, что это пурпурный цвет, дополнительным к которому является зеленый цвет с цветовым тоном $\lambda=540$ нм.

Пурпурные цвета замыкают разрыв между красными и фиолетовыми цветами, и вся палитра спектральных и чистых пурпурных цветов может быть представлена цветовым кругом (рис. III). На нем показаны только характерные цвета спектра. В действительности же нужно было бы показать непрерывную полосу, в которой имеется множество цветов, плавно переходящих один в другой. Однако наш глаз способен даже при самых благоприятных условиях отличать друг от друга лишь около 200 спектральных и чистых пурпурных цветов. Каждый из этих двухсот цветов, смешанный в различной пропорции с белым цветом, дает множество цветов одинакового цветового тона и разной чистоты цвета. Из этого множества цветов одинакового цветового тона наш глаз может отличить друг от друга тоже лишь ограниченное их число. Для спектральных цветов разного цветового тона это число составляет от четырех (желтый цвет) до двадцати пяти (красный цвет). Наименьшее число ступеней цветов, которое может отличать глаз при разбавлении спектрального цвета белым, имеет место для желтого цвета и наибольшее для красного и синего цветов.

Наименьшее воспринимаемое глазом различие в цвете носит название порога цветоразличения. Указанные выше числа количества различимых глазом цветов данного цветового тона от белого до спектрального представляют собой число порогов цветоразличения. Это число порогов характеризует насыщенность спектральных цветов. Наиболее насыщенными являются красный и синий цвета. Наименее насыщенным — желтый цвет. Таким образом, не следует отождествлять насыщенность и чистоту цвета, являющихся различными понятиями.

Аддитивное сложение цветов. Возьмем три проекционных фонаря, дающих узкие пучки света. На пути первого проекционного фонаря перед выходным отверстием установим красный светофильтр, на пути второго — зеленый и на пути третьего — синий.

Красный, зеленый и синий светофильтры выбраны нами потому, что красный, зеленый и синий источники света являются взаимно независимыми. Это означает, что цвет каждого из них не может быть получен смешением световых потоков остальных двух. Направим пучки этих источников света на белый рассеивающий экран так, чтобы они частично перекрывали друг друга (рис. IV). В тех местах экрана, где цветовые пучки не перекрываются, мы видим красный, зеленый и синий цвета определенной яркости. Там, где пучки перекрываются попарно, получаются желтый, голубой и пурпурный цвета. В центре же, где перекрываются все три пучка, получается белое пятно. Белый цвет в центре получается только при одном совершенно определенном соотношении между яркостями красного, зеленого и синего пятен на экране. Изменим положение цветовых источников света относительно белого экрана, например красный удалим, зеленый приблизим, а синий оставим на месте. Этим мы изменим соотношение яркостей красного, зеленого и синего пятен на экране.

В результате в тех местах, где пучки не перекрываются, получим цвета той же цветности, что и раньше, но несколько иной яркости. Попарно смешанные пучки дадут цвета, отличающиеся от получавшихся раньше, а в центре вместо белого пятна будет какой-то хроматический цвет. Изменяя различным образом положения взятых цветных источников света относительно белого экрана, мы можем получать различные хроматические цвета спектра, включая пурпурные цвета, которые отсутствуют в спектре. В рассмотренном случае смешение цветов получалось при отражении от белого экрана падающих на него цветных световых потоков.

Другой способ смешения цветов при отражении света заключается в следующем. Два кружка разного цвета, разрезанные по радиусу, вставляются один в другой так, что получается кружок, состоящий из двух секторов разных цветов (рис. 9). Надвигая один кружок на другой, можно изменять соотношение площадей секторов взятых цветов. При быстром вращении кружков вокруг их центров с помощью небольшого электрического двигателя мы не будем различать раздельно составляющих этот кружок цветных секторов. Цветные секторы быстро следуют один за другим и создают в глазу ощущение одного смешанного цвета. Изменяя соотношение разноцветных секторов, можно получить всевозможные смеси, промежуточные между взятыми цветами.

Можно привести еще один способ смешения цветов, основанный на слиянии в глазу ощущений от отдельных цветов. На поверхность наносятся цветные точки, имеющие разные цвета и расположенные очень близко друг к другу. При рассматривании их на достаточно большом расстоянии эти цветные точки не вос-

принимаются глазом раздельно, а сливаются в одно изображение, соответствующее цвету их смеси. Таким способом в текстильной промышленности получают разноцветные ткани, скручивая вместе достаточно тонкие разноцветные нитки. Этим эффектом пользуются и в полиграфической промышленности при изготовлении цветных иллюстраций.

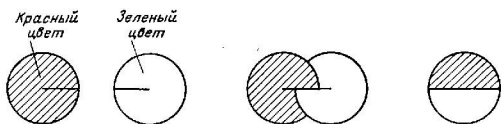


Рис. 9. Диск с раздвигающимися секторами для смешения цветов при вращении.

Вспомним, что излучение ртутной лампы высокого давления состоит из нескольких монохроматических излучений разных длин волн: синих, зеленых и желтых. Смотря на зажженную ртутную лампу, мы не видим отдельных составляющих ее излучений и воспринимаем ее излучение как суммарное сине-зеленого оттенка.

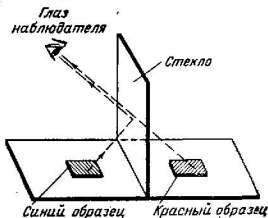


Рис. 10. Простейший прибор для аддитивного смешения цветов.

Смешение цветов, которое получается оптическим путем при смешении в глазу монохроматических световых потоков цветных источников света (ртутная лампа) при отражении или преломлении света, с помощью вращающегося диска и при слиянии очень близко расположенных друг от друга маленьких разноцветных точек, называется оптическим, или аддитивным (слагательным) смешением цветов. На наш орган зрения действуют все составные части, участвующие в создании ощущения того или иного цвета. Оптическое смешение цветов можно также осуществить следующим способом.

Возьмем чистое, бесцветное, прозрачное стекло и укрепим его вертикально (рис. 10). Слева и справа от стекла расположим по одному цветному образцу, как это указано на рис. 10 (слева синий и справа красный).

Если теперь будем смотреть на стекло под некоторым углом, то увидим на фоне поверхности, на которой лежат образцы, цвет смеси обоих образцов — синего и красного. Мы видим цвет смеси потому, что красный цвет наблюдаем сквозь стекло, а синий цвет попадает в глаз наблюдателя после отражения от поверхности стекла. Изменяя положение головы и наклон стекла, можно ослабить долю одного или другого цвета в их смеси. Таким образом,

мы увидим цвета, соответствующие смеси этих исходных цветов, взятых в различных пропорциях. Если два смешиваемых таким образом цвета являются дополнительными, то при некотором положении глаз наблюдателя мы можем увидеть ахроматический цвет.

Субтрактивное образование цветов. Возьмем мощную лампу накаливания, излучающую белый свет. Посмотрим через какой-либо светофильтр (цветное стекло) на светящуюся нить лампы накаливания. Предположим, что прошедший через этот светофильтр световой поток лампы вызовет у нас ощущение желтого цвета. Это означает, что мы взяли желтый светофильтр, который из белого света, состоящего из смеси всех цветов спектра, поглотит (вычтет) фиолетовые и синие излучения и пропустит зеленые, желтые и красные излучения, которые в совокупности создадут у нас ощущение желтого цвета.

Допустим, что другой светофильтр при рассматривании через него светящейся лампы накаливания даст нам ощущение голубого цвета. Голубой светофильтр поглощает из состава белого света красные и оранжевые излучения и пропускает фиолетовые, синие и зеленые излучения, которые в совокупности создают у нас ощущение голубого цвета.

Если сложим теперь вместе желтый и голубой светофильтры и пропустим через них световой поток мощной лампы накаливания, то желтый светофильтр поглотит из состава белого света фиолетовые и синие излучения и через него пройдут красные, оранжевые, желтые и зеленые излучения. Голубой же светофильтр поглотит из состава света, прошедшего желтый светофильтр, красные, оранжевые и желтые излучения. Таким образом, сквозь оба светофильтра пройдут зеленые излучения и нить лампы представится нам зеленого цвета. Складывая пурпурный и голубой светофильтры, получаем синий цвет, а комбинируя пурпурный и желтый светофильтры, — красный цвет.

Возьмем три светофильтра: пурпурный, голубой и желтый, имеющих форму диска. Сложим эти три светофильтра так, чтобы они частично перекрывали друг друга. Пропустим сквозь такую комбинацию светофильтров узкий пучок белого света и направим его на белый рассеивающий экран. На экране мы увидим картину, представленную на рис. V. В центре экрана получается черное пятно, так как в центральной части наложены друг на друга все три светофильтра, а в такой комбинации они не пропускают света. В тех местах, где светофильтры перекрываются попарно, мы получаем красный, синий и зеленый цвета. На периферии светофильтры не перекрывают друг друга, и мы видим пурпурный, желтый и голубой цвета, соответствующие цветам взятых светофильтров.

Из сказанного следует, что, вычитая из белого света соответствующие излучения, можно получить красный, зеленый и синий цвета, а также любые другие цвета. Такой способ образования цветов носит название субтрактивного (вычитательного).

Предположим, что нужно получить какой-либо цвет субтрактивным способом из белого света. Для этого мы должны пропустить белый свет через светофильтр, который из всего видимого спектра белого света поглотил бы излучения, соответствующие дополнительному цвету к тому цвету, который надо получить. В самом деле, если два цвета являются дополнительными, то вычитая один из них из белого цвета, получаем второй цвет. Цветовое ощущение, которое мы получаем при наблюдении светового потока, прошедшего светофильтр, определяется излучениями, попадающими в глаз. Таким образом, это цветовое ощущение получается в результате аддитивного смешения в глазу попадающих в него излучений.

Субтрактивный способ образования цветов широко применяется в цветном кино и в цветной фотографии.

Субтрактивное образование цветов имеет место при наложении красок на поверхность бумаги, полотна или других материалов. Краска представляет собой зерна одного или нескольких различных пигментов, перемешанных между собой и скрепленных каким-либо связующим веществом. Связующее вещество может быть бесцветным и прозрачным или обладать избирательным пропусканием и некоторым рассеянием.

Предположим для простоты, что связующее вещество прозрачно и бесцветно. Свет, падая на поверхность краски, частично отразится без изменения цвета от верхнего слоя, остальная же часть света войдет в слой краски. На своем пути световой поток встретит частицы пигментов, из которых состоит краска. Проходя через частицы пигментов, световой поток будет частично отражаться и поглощаться ими, но по-разному, в зависимости от физических свойств данного пигмента. Ахроматические пигменты, белые, серые и черные, поглощают световой поток неизбирательно, все же остальные избирательно, т. е. изменяют спектральный состав проходящего через них света.

Цвет краски есть результат смешения отраженного от поверхности слоя краски и вышедшего после прохождения этого слоя светового потока. Образование цвета слоя краски не представляет собой субтрактивного образования цвета в чистом виде, как мы это имеем при прохождении света через светофильтр, и является результатом более сложных явлений. Как правило, связующие вещества, применяемые для красок, не являются совершенно прозрачными и бесцветными, как мы это предположили, и это еще усложняет процесс образования цвета слоя краски.

ГЛАЗ — ПРИЕМНИК СВЕТА

Познакомимся с устройством и работой нашего органа зрения — глаза.

Наш глаз представляет собой шарообразное тело и помещается в глазнице. На рис. 11 показан разрез глаза. Наружная часть глаза, называемая склерой, представляет собой полупрозрачную,

упругую оболочку белого цвета (в обиходе называется белком глаза), которая обеспечивает глазу защиту и сохранение формы. В передней части склера переходит в прозрачную роговую оболочку. Под роговой оболочкой расположены радужная оболочка, по цвету которой судят о так называемом «цвете» глаз, а за ней хрусталик. Радужная оболочка играет в глазу роль диафрагмы в фотоаппарате, ее внутреннее отверстие может становиться больше или меньше в зависимости от условий видения. Хрусталик, играющий в глазу такую же роль, как объектив в фотоаппарате,

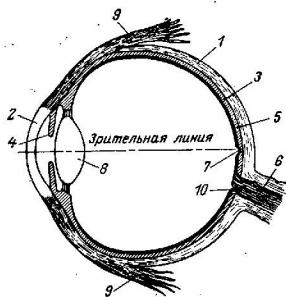


Рис. 11. Разрез глаза.

1 — склера (белок); 2 — роговая оболочка; 3 — сосудистая оболочка; 4 — радужная оболочка; 5 — сетчатая оболочка (сетчатка); 6 — зрительный нерв; 7 — центральная ямка; 8 — хрусталик; 9 — глазная мышца; 10 — слепое пятно.

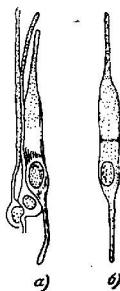


Рис. 12. Светочувствительные клетки (большое увеличение).

а — колбочки; б — палочки.

имеет форму двояковыпуклой линзы. Он прозрачен, обладает упругостью и своими краями скреплен со специальными мышцами. Посредством этих мышц может изменяться кривизна поверхности хрусталика, особенно задней. В фотографических аппаратах резкое изображение (фокусировка) достигается путем перемещения линзы вперед или назад по отношению к фотопластинке. В глазу эта фокусировка совершается автоматически. Когда мы переводим взгляд с удаленного предмета на расположенный ближе (или наоборот), то мышцы, с которыми соединен хрусталик, сжимаются или разжимаются, и хрусталик приобретает нужную кривизну, обеспечивающую четкое изображение рассматриваемого предмета на глазном дне. Внутренняя часть глаза наполнена прозрачным стекловидным веществом. К склере примыкает сосудистая оболочка, а к сосудистой оболочке сетчатая оболочка (сетчатка), которая соприкасается со стекловидным телом. Сетчатка состоит из нескольких прозрачных слоев и имеет очень

сложное строение. Слон сетчатки, обращенные к хрусталику, настолько прозрачны, что не препятствуют прохождению сквозь них света, который образует на последнем слое изображение рассматриваемого предмета. Сетчатка является приемным экраном, на который проектируются наблюдаемые нами предметы. Как мы увидим дальше, сетчатка выполняет в глазу роль, напоминающую роль светочувствительного слоя фотопластины в фотоаппарате.

Таким образом, глаз человека можно сравнить с фотографической камерой, так как в нем имеются все элементы, присущие фотокамере. Однако человеческий глаз несравненно более сложное, чем фотоаппарат, устройство.

Последний слой сетчатки, на котором получается четкое изображение рассматриваемого предмета, состоит из светочувствительных клеток двух видов: колбочек и палочек (рис. 12). Колбочки имеют диаметр около 5 мкм, а палочки — около 2 мкм. В колбочках и палочках имеются светочувствительные вещества (в колбочках одного состава, а в палочках другого), которые цветут под воздействием света. С помощью сосудистой оболочки, к которой прилегает последний слой сетчатки, светочувствительные вещества (в колбочках и палочках) восстанавливаются. Следует указать на то, что восстановление светочувствительного вещества в палочках происходит значительно медленнее, чем в колбочках.

От колбочек и палочек отходят нервные волокна, которые собираются в зрительный нерв и идут от глаза к коре головного мозга. Как установлено очень сложными и очень тонкими опытами над глазами живых животных, при попадании света в глаз в результате распада светочувствительных веществ, содержащихся в колбочках и палочках, в последних возникают электрические заряды. Вследствие этого по нервным волокнам протекают и передаются к коре головного мозга ритмичные (повторяющиеся) электрические импульсы, следующие друг за другом через определенные промежутки времени.

Электрические импульсы различной величины и частоты, возбуждаемые попадающим в глаз светом, передаются в соответствующие участки коры головного мозга и вызывают восприятие света, цвета, контраста и т. д.

В сетчатке каждого глаза имеется около 126 млн. светочувствительных клеток, из которых примерно 120 млн. палочек и 6 млн. колбочек. Зрительный нерв заключает в себе около 1 млн. нервных волокон. Палочки присоединены к нервным волокнам целыми кустами (группами), в которые входит от 15 до 400 палочек. Колбочки же присоединяются к нервным волокнам таким образом, что к одному нервному волокну может быть присоединена одна или несколько колбочек. Кроме того, имеются колбочки, которые присоединены к нервному волокну совместно с группами палочек. Место вхождения зрительного нерва в глаз называется слепым пятном. В слепом пятне отсутствуют светочувствительные элементы, поэтому этим местом сетчатки мы не видим.

Существует еще одно примечательное место на сетчатке — это центральная ямка, расположенная в центре сетчатки и имеющая очень небольшой угловой размер $1,5^\circ$. Нам приходится смотреть вдаль, рассматривать близкие предметы и их детали. При помощи изменения кривизны хрусталика, о котором говорилось выше, мы можем наводить изображение предметов на фокус, и изображение предмета или деталь попадают на центральную ямку. При этом обеспечивается наибольшая четкость различения формы детали.

В центральной ямке из светочувствительных клеток имеются только колбочки, а палочки отсутствуют. Число колбочек в центральной ямке достигает 30—40 тыс. Каждая колбочка в большинстве случаев соединяется с одним нервным волокном. К центральной ямке прилегает область, называемая желтым пятном, которая дает относительно резкое различение деталей. Угловой размер желтого пятна $6-8^\circ$. В желтом пятне концентрация колбочек значительно меньше, чем в центральной ямке, и, кроме колбочек, в нем имеются палочки, число которых растет с удалением от центра желтого пятна. Дальше, к периферии глаза, концентрация палочек еще увеличивается, а колбочек — резко уменьшается.

В процессе зрения участвуют центральная ямка, желтое пятно и периферическая часть сетчатки, поэтому наш глаз является широкоугольной оптической системой. Мы видим предметы, находящиеся под большими углами к оси зрения. При неподвижном глазе можно различать предметы до углов $50-60^\circ$ к оси зрения, а в направлении виска даже до $90-95^\circ$. Однако если центральной ямкой мы видим резкое изображение предмета, то периферической частью сетчатки — только контурное изображение находящихся в поле зрения предметов. Таким образом, периферическая часть сетчатки играет второстепенную роль в процессе зрения по сравнению с центральной ямкой.

Наш глаз является чрезвычайно чувствительным прибором. Глаз способен в темноте мгновенно различать очень слабый свет. Так, в темную ночь при достаточной прозрачности воздуха глаз способен увидеть горящую свечу с расстояния 4—5 км. Но это еще не предел чувствительности. Порогом чувствительности глаза, который характеризует собой предел чувствительности, называется то наименьшее количество лучистой энергии, которое, попадая в глаз в условиях полного приспособления к темноте, вызывает первое ощущение света. Для нормального глаза пороговое значение энергии составляет ничтожную величину: для того чтобы нагреть 1 г воды на 1°C , нужно было бы эту энергию накапливать 60 млн. лет.

Но глаз характеризуется не только чрезвычайно высокой абсолютной чувствительностью, но отличается, кроме того, и очень большим диапазоном чувствительности. С одной стороны, он воспринимает ничтожные количества света, попадающие в глаз, а с другой стороны — он способен воспринимать и значительные количества световой энергии. Максимальное количество лучистой энергии, попадающей в зрачок, которое еще выдерживает глаз без

ущерба, таково, что при непрерывном накоплении ее в течение получаса 1 г воды мог бы быть нагрет этой энергией на 1 °С. Приведенные цифры характеризуют огромный диапазон чувствительности глаза, позволяющего воспринимать лучистые потоки, отличающиеся по мощности примерно в 1 000 млрд. раз. Глаз является наиболее чувствительным из всех известных в настоящее время оптических приборов.

Предположим, что глаз, пробывший некоторое время в темноте, наблюдает светящуюся точку очень малой яркости, причем в глаз попадает количество световой энергии несколько большее, чем пороговое. В светочувствительных клетках, колбочках и палочках в этом случае происходит разложение светочувствительных веществ, возникают электрические заряды и по нервным волокнам передаются электрические импульсы тока. Поскольку источник света имеет очень малую яркость, то и электрические заряды, возникающие в каждой светочувствительной клетке, очень малы.

Почти каждая из колбочек в центральной ямке присоединена только к одному нервному волокну, и возникающие в колбочках электрические заряды недостаточны для возникновения зрительного ощущения. Одновременно разложение светочувствительного вещества происходит и в палочках. В каждой из них также возникают ничтожные электрические заряды, но поскольку палочки объединены в довольно большие группы, то суммарные электрические заряды становятся достаточными, чтобы возникло зрительное ощущение. Таким образом, при ночном освещении (в условиях малых яркостей) продуктивно с точки зрения создания зрительного ощущения работают только палочки.

Возьмем источник света несколько большей, чем раньше, яркости. Распад молекул светочувствительного вещества в палочках будет происходить более интенсивно, и соответственно будет происходить его восстановление. Колбочки еще не будут принимать участия в создании зрительного ощущения. При дальнейшем увеличении яркости источника света распад и восстановление светочувствительного вещества в палочках будут равны. В колбочках же при этом будет распадаться больше молекул светочувствительного вещества, чем раньше, в результате чего в них будут возникать электрические заряды, уже способные создавать зрительное ощущение.

При еще большем увеличении попадающей в глаз световой энергии распад светочувствительного вещества в палочках не сможет быть уравновешен его восстановлением вследствие сравнительно медленного процесса восстановления в палочках, и молекулы светочувствительного вещества в них будут все в меньшем количестве.

При яркостях, с которыми мы встречаемся при нормальном вечернем освещении и днем, число молекул светочувствительного вещества в палочках становится ничтожным, так как его разложение происходит очень быстро, а восстановление сравнительно мед-

ленно, и, следовательно, электрические заряды, создаваемые в них, будут настолько малы, что даже при совокупном их действии не смогут создавать зрительные ощущения. В условиях больших яркостей, так же как и в палочках, разложение светочувствительного вещества в колбочках происходит достаточно быстро. Но поскольку восстановление светочувствительного вещества в колбочках идет значительно быстрее, чем в палочках, то в колбочках все время имеются молекулы светочувствительного вещества, и, следовательно, создается зрительное ощущение.

Таким образом, наш зрительный аппарат способен действовать как в условиях малых и больших яркостей, так и в промежуточной области яркостей. При малых яркостях работают в основном палочки, в условиях больших яркостей — в основном колбочки, а в промежуточной области яркостей работают одновременно палочки и колбочки.

Переход от ночного (палочкового) зрения к дневному (колбочковому) и наоборот происходит не сразу, а в течение некоторого промежутка времени. Глаз приспосабливается к новым условиям работы. Это наглядно видно при переходе из темноты на яркий свет (световая адаптация¹) и с яркого света в темноту (темновая адаптация).

Вспомним, что переход из темного помещения на улицу в солнечный день сопровождается болезненным ощущением для глаз, и вначале мы ничего не видим. Приходится щуриться для того, чтобы ограничить попадание большого количества света внутрь глаз. Зрачок в таких условиях автоматически сужается до своей наименьшей величины, его диаметр становится равным примерно 2 мм. Через 3—4 мин болезненное ощущение проходит, и мы начинаем различать окружающие нас предметы. Глаз приспособился к условиям освещения.

Если, наоборот, мы входим с яркого света в темное помещение, то в течение 5—10 мин вообще ничего не видим, а по прошествии этого времени начинаем различать некоторые предметы. В таких условиях диаметр зрачка становится наибольшим и равным 6—8 мм. После 50—60-мин пребывания в затемненном помещении глаз настолько хорошо приспособляется к темноте, что без труда различает всю окружающую обстановку, и мы свободно ориентируемся в таком помещении.

Значительное время, необходимое для полного приспособления глаза к темноте после яркого света, и малое время, необходимое для обратного перехода, показывает наглядно, насколько восстановление светочувствительного вещества в палочках происходит медленнее, чем в колбочках.

Спектральная чувствительность глаза, т. е. чувствительность к монохроматическим излучениям одинаковой мощности, но разных длин волн видимой области спектра, неодинакова. Это озна-

¹ Адаптация глаза — приспособление глаза к данным условиям освещения.

чает, что излучения различных длин волн по-разному воздействуют на светочувствительные элементы глаза. Наиболее сильное воздействие на глаз оказывает излучение с длиной волны 555 нм, соответствующее желто-зеленому цвету. По мере приближения к началу и концу видимой области спектра чувствительность глаза резко падает и за пределами этой области равна нулю. Если измерить чувствительность глаза для разных длин волн видимой области спектра и изобразить эту зависимость графически, то получим кривую спектральной чувствительности глаза. Для отдельных людей кривые спектральной чувствительности глаза несколько раз-

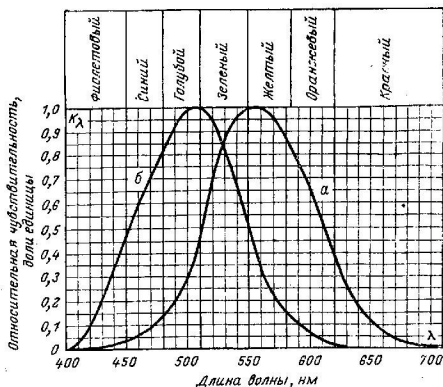


Рис. 13. Кривая спектральной чувствительности нормального глаза для дневного света (а) и для ночного зрения (б).

нятся друг от друга. На рис. 13 (кривая а) представлена усредненная кривая спектральной чувствительности глаза человека при дневном зрении (для стандартного фотометрического наблюдателя МКО¹). Чувствительность глаза к излучению с длиной волны $\lambda=555$ нм принята за единицу, а остальные значения чувствительности взяты по отношению к единице.

Установлено, что световой поток монохроматического излучения с длиной волны $\lambda=555$ нм мощностью в 1 Вт имеет наибольшее значение по сравнению с другими монохроматическими излучениями той же мощности и составляет 683 лм.

Это означает, что если бы мы, например, взяли источники света с монохроматическими излучениями $\lambda_1=520$ нм (зеленый

¹ МКО — Международная комиссия по освещению.

цвет) и с $\lambda_2 = 650$ нм (красный цвет), для которых относительная чувствительность глаза составляет соответственно 0,5 и 0,25, то при их мощности в 1 Вт первый из них имел бы световой поток 341,5 лм, а второй 170,75 лм. Следовательно, освещенность или яркость освещенной этими источниками света поверхности была бы соответственно в 2 и в 4 раза меньше, чем при источнике света с $\lambda = 555$ нм. При необходимости создания освещенности поверхности от источников с излучениями λ_1 или λ_2 , равной освещенности от источника света с $\lambda = 555$ нм, мы должны были бы взять их мощности в 2 и 4 раза большими, чем для источника с излучением $\lambda = 555$ нм, т. е. для источника света $\lambda_1 = 520$ нм — 2 Вт и для $\lambda_2 = 620$ нм — 4 Вт.

Таким образом, световой поток источников света, излучение которых не является монохроматическим, а состоящим из ряда монохроматических излучений или имеющим непрерывный спектр, который можно рассматривать как совокупность значительного числа монохроматических излучений, определяется как их мощностью, так и относительной чувствительностью глаза для монохроматических составляющих излучения. Это обстоятельство следует учитывать при выборе мощности осветительных приборов для цветного освещения сцены, арены, эстрады в зрелищных предприятиях, при цветном освещении витрин, при устройстве установок цветной световой рекламы и др.

Однако кривая спектральной чувствительности глаза не является постоянной для любых условий освещения. Как было впервые установлено чешским ученым Я. Пуркинье, кривая спектральной чувствительности глаза несколько сдвигается в сторону синей границы видимой области спектра в зависимости от уменьшения уровня яркости объектов наблюдения (эффект Пуркинье). На рис. 13 (кривая б) приведена кривая спектральной чувствительности глаза для ночного зрения (для стандартного фотометрического наблюдателя МКО). Для промежуточных уровней яркости цветных объектов наблюдения спектральные кривые чувствительности глаза будут занимать промежуточное положение между кривыми а и б. Как видим, кривые спектральной чувствительности глаза при дневном и ночном зрении смещены приблизительно на 45 нм.

Практически эффект Пуркинье состоит в неодинаковом потемнении разноцветных равноярких поверхностей при значительном уменьшении их яркости.

Представим себе два плоских образца, один из которых окрашен в красный, а другой в синий цвет. Добьемся того, чтобы в условиях дневного освещения они казались нам равнояркими. Если теперь каким-либо способом снизить в 10 000 раз освещенность обоих образцов, оставляя неизменным спектральный состав светового потока, то убедимся в том, что синий образец будет казаться нам более светлым, чем красный. Это означает, что спектральная чувствительность глаза при значительном уменьшении яркости в области синих коротковолновых излучений относительно

увеличилась, а в области красных длинноволновых излучений уменьшилась.

Как известно, красный мак при дневном освещении кажется нам более ярким, чем синий василек. При наступлении сумерек картина меняется. Синий василек кажется нам более светлым, чем мак.

Изменение кривой спектральной чувствительности глаза в зависимости от яркости является результатом наличия в глазу двух световоспринимающих аппаратов — палочек и колбочек, имеющих различную спектральную чувствительность.

Процесс передачи и возникновения зрительных ощущений необыкновенно сложен и в настоящее время еще недостаточно изучен, поэтому все сказанное относительно зрительного процесса является только примерной картиной сложнейших процессов, протекающих в светочувствительных клетках, нервных волокнах и коре головного мозга человека. Но зрительный процесс оказывается еще более сложным, если мы вспомним, что не только воспринимаем окружающий нас мир, но и ощущаем все великолепие цветов в окружающей нас природе. Вопрос о том, как мы воспринимаем цвет, очень давно заинтересовал ученых.

Гениальным русским ученым М. В. Ломоносовым была впервые в 1756 г.¹ высказана мысль о том, что в нашем глазу есть три рода светочувствительных элементов, которые по-разному реагируют на свет разного спектрального состава. Первые чувствительны преимущественно к красному, вторые преимущественно к зеленому и третьи — к голубому цветам. В результате дальнейшего развития этой теории было установлено, что светочувствительные элементы третьего рода чувствительны преимущественно не к голубому, а к синему цвету.

Если в глаз попадает красный свет, то на него в основном реагируют красночувствительные элементы. На зеленый свет реагируют в основном зеленочувствительные и на синий — в основном синечувствительные элементы. Если же в глаз попадает сложный световой поток, состоящий из ряда составляющих световых потоков разного цвета, то на него реагируют все три рода светочувствительных элементов. В зависимости от соотношения их реакции мы ощущаем результирующий цвет, соответствующий спектральному составу света, попадающему в глаз. При неравном возбуждении всех трех светочувствительных элементов мы ощущаем тот или иной хроматический цвет. В случае равного возбуждения трех светочувствительных элементов мы ощущаем ахроматический цвет.

Эта трехцветная теория цветового зрения, которая после М. В. Ломоносова была значительно развита Юнгом и Гельмгольцем, полностью подтвердилась фактами оптического смешения цветов. В самом деле, все возможные цвета могут быть получены,

¹ Эта теория была изложена М. В. Ломоносовым в его труде «Слово о происхождении света, новую теорию о цветах представляющее, июля 1 дня 1756 года говоренное».

как мы выяснили выше, смешением в разных пропорциях трех взаимно независимых цветов — красного, зеленого и синего.

Одним из доказательств правильности этой теории служит факт нарушения цветового зрения. Встречаются люди, которые не ощущают красного, зеленого или синего цветов. Они совсем по-другому, чем люди с нормальным цветовым зрением, воспринимают цвета окружающих нас предметов и природы. У людей, не ощущающих красного цвета, отсутствуют красночувствительные элементы, и таких людей называют красно-слепыми. У зелено-слепых отсутствуют зеленоощущающие элементы. Синие-слепые встречаются очень редко, у них отсутствуют синеощущающие элементы.

Не случайно, что у всех водителей транспорта — шоферов, машинистов и водителей трамвая очень тщательно проверяют цветовое зрение. Наличие одного из видов цветовой слепоты недопустимо для водителей транспорта, так как это может привести к аварии вследствие неразличения цветовых сигналов светофоров. Поэтому люди, у которых нарушено цветоощущение, к вождению транспорта не допускаются.

В течение последних 20—25 лет ученым удалось полностью доказать правильность трехцветной теории цветового зрения.

В результате чрезвычайно тонких опытов над живыми глазами различных животных, обладающих цветовым зрением, установлено, что единственно правильным представлением о цветовом зрении является изложенная выше в общих чертах трехцветная теория цветового зрения. С помощью микроскопа, вводимого в глаз, у ряда животных в сетчатке обнаружено три вида колбочек с различной чувствительностью к излучениям видимой области спектра. Кроме трех видов колбочек, обладающих узкими спектральными кривыми чувствительности, был обнаружен еще один вид колбочек, в которых присутствуют одновременно светочувствительные вещества, чувствительные к красному, зеленому и синему цветам, и с помощью которых мы ощущаем яркость. Наилучшим образом мы воспринимаем цвета тогда, когда действуют преимущественно наш колбочковый аппарат, т. е. в условиях хорошего освещения.

В условиях ночного зрения при очень слабом освещении наш глаз не различает цветов. Это означает, что наиболее чувствительный зрительный аппарат — палочковый аппарат — не обладает цветовой чувствительностью.

В заключение укажем вкратце на некоторые особенности цветового зрения.

Цветовая адаптация. При длительном воздействии какого-либо цвета на глаз чувствительность глаза к восприятию этого цвета снижается. Цветовая адаптация протекает в течение более короткого промежутка времени, чем световая адаптация. Наибольшее время адаптации имеет место для красного и фиолетового цветов и наименьшее для желтого и зеленого цветов. Человек, длительное время работающий с поверхностями красного цвета, через некото-

рое время теряет способность определять тонкие отличия этого цвета. Именно поэтому опытные продавцы в магазинах тканей рядом с тканями красного цвета размещают зеленые или синие ткани с тем, чтобы избежать цветовой адаптации и восстанавливать правильное восприятие цвета.

Одновременный цветовой контраст. Восприятие цвета зависит от цветов, на фоне которых рассматривается данный цвет. Один и тот же оранжевый цвет, рассматриваемый на фоне красного цвета, кажется более светлым, а на фоне желтого цвета — более темным. Лимон на фоне белой скатерти выглядит более темным, чем тот же лимон на синем фоне.

Явление зрительного изменения цвета наблюдаемого объекта в зависимости от цвета фона или соприкасающейся поверхности носит название одновременного цветового контраста.

Вопросы, связанные с одновременным цветовым контрастом, должны находить отражение при устройстве цветового оформления производственных помещений, поскольку поверхности оборудования, окрашенные в требуемые цвета, могут находиться в поле зрения работающих на фоне поверхностей, окрашенных в иные цвета. Это явление следует учитывать в практике оформления сценического освещения и др.

Последовательный цветовой контраст. Если из глубины комнаты днем смотреть некоторое время на освещенное естественным светом окно и затем закрыть глаза, то возникнет изображение окна, но распределение яркости и цвета будут иными. Места темного переплета будут казаться светлыми, а само окно темным. Цветные части объекта наблюдения мы увидим в цветах, близких к дополнительным цветам. Это явление, выражающееся в возникновении последовательного образа рассматриваемого объекта в цветах, близких к дополнительным цветам, носит наименование последовательного цветового контраста.

Начертим на середине листа белой бумаги круг диаметром 15—20 мм и закрасим всю его площадь красным карандашом так, чтобы она была покрыта равномерно красным цветом. Осветим лист бумаги с красным кружком так, чтобы он был хорошо освещен, и зафиксируем на красном кружке взгляд обоими глазами на 8—10 с, а затем переведем взгляд влево или вправо на 30—40 мм. Мы увидим на белом фоне круг такого же диаметра, как и красный, но голубоватого цвета небольшой чистоты. Если бы мы теперь нарисовали яркие кружки оранжевого, желтого, зеленого, голубого, синего, фиолетового и пурпурных цветов и проделали бы указанный несложный эксперимент, то увидели бы последовательные образы цветов, близких к дополнительным. Таким образом, последовательные образы имеют цвет, близкий к дополнительным цветам наблюдаемого объекта.

Явление возникновения цветных последовательных образов объясняется трехкомпонентной теорией зрения как результат пограничной возбудимости светочувствительных элементов глаза, которые преимущественно реагировали на рассматриваемый цвет

в предшествующий момент. Если мы смотрим на предмет красного цвета, то это означает, что в глаз попадает красный свет и на него в основном реагируют красночувствительные элементы. Если после фиксации красного цвета глаз перевести на белую поверхность, то отраженный от нее белый свет попадает в глаз на светочувствительные элементы с различной спектральной чувствительностью. Но красночувствительные элементы обладают пониженной чувствительностью после фиксации красного цвета, а зеленочувствительные и синечувствительные — полной чувствительностью. Поэтому последовательный образ мы видим как результат смеси зеленого и синего цветов, т. е. голубого цвета.

Последовательные образы могут наблюдаться не только на белом фоне, где они выделяются наиболее четко, но и на фоне других цветов и смешиваются с ними.

Говоря о последовательных образах, следует иметь в виду, что светлота последовательного образа обратна светлоте наблюдаемого объекта, цвет последовательного образа является близким к дополнительному, имеет малую чистоту цвета и смешивается с цветом фона.

Вопросы, связанные с последовательными цветовыми контрастами и возникающими последовательными образами, имеют большое практическое значение и должны учитываться для правильного цветового решения рабочих мест на производстве при устройстве цветового оформления производственных помещений, с тем чтобы по возможности исключить появление мешающих работе последовательных образов.

Постоянство восприятия цвета объектов. Явление постоянства восприятия цвета объектов, свойственное нашему органу зрения, заключается в том, что их цвет воспринимается нами независимо от того, каким он является при ином, чем обычно, освещении. Так, например, мел мы воспринимаем белым независимо от того, освещен ли он в помещении днем при естественном ярком солнечном свете, в пасмурный день, когда мы видим его темным, или вечером при освещении лампами накаливания, когда он имеет желтоватый оттенок.

Исходя из явления постоянства восприятия цвета предметов, может быть сделан вывод о том, что предметы сохраняют для нас свой цвет как объективное качество в различных (не резко измененных) условиях освещения и наблюдения, и мы свободно узнаем эти предметы. Здесь проявляется ведущая роль в предметно-смысловом содержании восприятия человека в его практической деятельности и формировании образов предметов. Это явление имеет для нас очень большое практическое значение.

Явление постоянства восприятия цвета предметов наблюдается при восприятии старинной живописи, когда зритель, несмотря на изменившийся цвет ахроматических объектов на картине из-за пожелтевшего в соответствующих местах лака, оценивает их как ахроматические независимо от того, что ахроматических пятен или предметов на картине уже нет.

КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ЦВЕТОВ И ИХ ОБОЗНАЧЕНИЕ

Мы уже говорили о том, что число цветов, воспринимаемых глазом, очень велико. Совершенно понятно, что у нас нет возможности дать наименования всем существующим цветам.

С другой стороны, при современном развитии науки и техники необходима количественная оценка цветов, которая дала бы возможность однозначно обозначать любой цвет и воспроизводить его. Количественно оценивать любой цвет можно, исходя из явления смешения цветов.

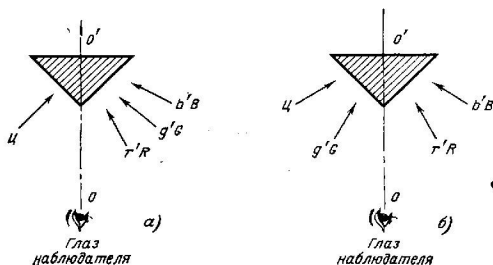


Рис. 14. Простейший цветоизмерительный прибор.

Выше было выяснено, что все существующие цвета могут быть получены путем смешения трех взаимно независимых цветов — красного, зеленого и синего, взятых в определенных количествах.

Выберем три взаимно независимых цвета: красный, зеленый и синий. Назовем эти цвета основными, так как эти три цвета обуславливают систему определения цветов, и обозначим красный буквой R^* , зеленый — G и синий — B . Осветим этими основными цветами центральную часть белого рассеивающего экрана. Изменяя световые потоки этих цветов, добьемся того, что цвет их смеси будет белым. При этом световые потоки основных цветов, образующих при смешении белый цвет, будем считать единичными. Таким образом, с количественной точки зрения основные цвета являются единичными цветами.

Возьмем гипсовую призму (рис. 14). Две ее грани расположены под углом 90° друг к другу. Смотря на грани призмы в направлении оси OO' , мы увидим обе грани расположенными рядом и разделенными тонкой линией. Грани призмы будем называть полями сравнения. Такое устройство является простейшим цветоизмерительным прибором. Одно из полей сравнения осветим каким-либо хромати-

* R , G и B являются начальными буквами английских слов red (красный), green (зеленый) и blue (синий).

ческим цветом, который обозначим буквой Ц , а второе поле сравнения осветим тремя основными цветами R , G и B . Поскольку гипс является материалом, который неизбирательно отражает свет, то первое поле сравнения будет иметь цвет такой же, как и освещающий его световой поток Ц , и будет иметь некоторую яркость, которая определяется величиной светового потока, отраженного от этого поля сравнения.

Постараемся добиться того, чтобы второе поле сравнения, освещаемое цветами R , G и B , было неотличимым от первого как по цветности (цветовой тон и чистота цвета), так и по яркости.

Очевидно, что условие тождественности (неотличаемости) обоих полей сравнения выразится математически следующим образом (рис. 14,а):

$$\text{Ц} = r'R + g'G + b'B. \quad (1)$$

Знак тождества ($\equiv$) указывает на то, что оба поля имеют одинаковые цветность и яркость, т. е. неотличимы друг от друга. Это в свою очередь означает, что световые потоки, освещающие оба поля сравнения, равны по величине и цветности.

Написанное уравнение, называемое *цветовым уравнением*, показывает, что для получения цвета, тождественного с цветом Ц , надо смешать r' единиц красного цвета R , g' зеленого цвета G и b' синего цвета B . Таким образом, r' , g' и b' являются коэффициентами цветового уравнения, показывающими, сколько единиц каждого из основных цветов надо взять, чтобы получить данный цвет Ц . Коэффициенты r' , g' и b' носят название *координат* цвета. Произведения $r'R$, $g'G$ и $b'B$ являются составляющими цвета Ц и носят название *цветовых составляющих*.

Опыты смешения цветов показывают, что для целого ряда цветов Ц для получения равенства обоих полей сравнения по цветности и яркости к цвету Ц , освещающему одно из полей сравнения, надо прибавить еще некоторое количество одного из основных цветов (рис. 14,б).

Например, для одного из таких цветов Ц цветовое уравнение будет иметь вид:

$$\text{Ц} + g'G = r'R + b'B. \quad (2)$$

Для каждого из таких цветов Ц тождественность полей сравнения получается только при одном определенном соотношении между r' , g' и b' , причем к некоторым из цветов Ц для получения цветового равенства полей сравнения нужно прибавить определенное количество цвета R , для других — цвета G и для третьих — цвета B .

Перенесем цветовую составляющую $g'G$ (2) в правую часть тождества

$$\text{Ц} = r'R - g'G + b'B. \quad (3)$$

При такой форме записи цветового уравнения одной из цветовых составляющих условно приписывается отрицательное значение.

Основные цвета R , G и B в принятой системе определения цветов являются постоянными, поэтому заданный цвет Π определяется полностью (по цветности и яркости) координатами цвета r' , g' и b' , являющимися переменными величинами.

Во многих случаях практики требуется определение лишь качественной характеристики цвета излучения источника света или светового потока, отраженного от поверхности предмета. В этом случае удобно пользоваться относительными значениями координат цвета, являющихся отношением каждой из координат цвета r' , g' и b' к их сумме $r' + g' + b'$.

Относительные значения координат цвета носят название координат цветности и обозначаются r , g и b :

$$\left. \begin{aligned} r &= \frac{r'}{r' + g' + b'}; \\ g &= \frac{g'}{r' + g' + b'}; \\ b &= \frac{b'}{r' + g' + b'}; \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$$r + g + b = \frac{r'}{r' + g' + b'} + \frac{g'}{r' + g' + b'} + \frac{b'}{r' + g' + b'} = \frac{r' + g' + b'}{r' + g' + b'} = 1; \\ r + g + b = 1. \quad (5)$$

Как показывает равенство (5), если известны две координаты цветности (предположим r и b), то третья может быть определена по формуле

$$g = 1 - (r + b).$$

Итак, качественная характеристика цвета (цветность) определяется тремя координатами цветности r , g и b , в сумме равными единице. Исходя из этого, любой цвет может быть изображен графически.

Как известно, алгебраическая сумма (т. е. с учетом знака, рис. 15) перпендикуляров, опущенных из любой точки, находя-

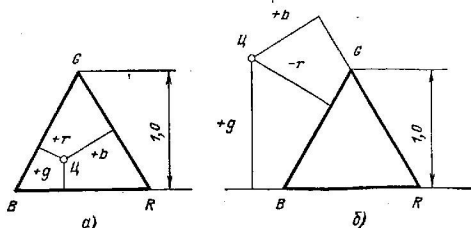


Рис. 15. Изображение цвета с помощью цветового треугольника.

шейся внутри или вне равностороннего треугольника, на его стороны, равна его высоте. Возьмем высоту равностороннего треугольника, равную единице. Тогда сумма перпендикуляров, опущенных из любой точки внутри или вне его на его стороны, будет равна единице. Поскольку сумма координат цветности также равна единице, то каждый из перпендикуляров, опущенных из точки внутри или вне равностороннего треугольника на его стороны, может представлять одну из координат цветности (рис. 15). Исходя из этого, любой цвет может быть изображен точкой внутри или вне равностороннего треугольника, имеющего высоту, равную единице.

В вершинах такого цветового треугольника расположены основные цвета R , G и B (рис. 15). Все цвета, которые могут быть получены непосредственным смешением трех основных цветов R , G и B , согласно уравнению (1) размещаются внутри цветового треугольника (рис. 15,а). Перпендикуляры, опущенные из точки, которая изображает данный цвет C , на стороны треугольника, равны соответствующим координатам цветности и в сумме равны единице.

Перпендикуляр, опущенный на сторону, лежащую против той вершины треугольника, где расположен основной цвет R , дает координату цветности r . Остальные перпендикуляры, опущенные на стороны треугольника, расположенные против вершин, в которых расположены основные цвета G и B , дадут координаты цветности g и b . В этом случае все три координаты цветности r , g и b положительны.

Все цвета, которые не могут быть получены непосредственным смешением цветов R , G и B , располагаются вне цветового треугольника (рис. 15,б). В этом случае перпендикуляры, опущенные из точки цвета на стороны треугольника, также равны соответствующим координатам цветности и в сумме равны единице. Однако в отличие от рассмотренного случая, когда точка цвета находится внутри треугольника, в этом случае одна из координат цветности отрицательна. В частности цвет C , показанный на рис. 15,б, имеет отрицательную координату цветности r . Этот случай соответствует сложению цветов согласно уравнению (3).

В первой трехцветной международной колориметрической¹ системе² определения цвета RGB , построенной на изложенном принципе, в качестве основных цветов были приняты следующие монохроматические излучения:

$$\begin{aligned} R &= 700 \text{ нм;} \\ G &= 546,1 \text{ нм;} \\ B &= 435,8 \text{ нм.} \end{aligned}$$

Красный цвет R получался с помощью лампы накаливания и красного светофильтра. Зеленый G и синий B цвета получались

¹ Colour — цвет (англ.).

² Трехцветной колориметрической системой называется система определения цвета, основанная на возможности воспроизведения данного цвета путем аддитивного смешения трех основных цветов.

путем выделения излучений с длинами волн 546,1 и 435,8 нм из спектра излучения ртутной лампы. Излучения с длинами волн 435,8 и 546,1 нм являются преобладающими в спектре ртутной лампы (рис. 6), имеют достаточно большую мощность и поэтому были использованы в качестве основных цветов. Световой поток основного красного цвета R был принят равным 683 лм, зеленого цвета G — 3180 лм и синего цвета B — 43 лм.

Световые потоки единичных основных цветов R , G и B подобраны так, что при их смешении получается белый цвет, располагающийся в центре равностороннего цветового треугольника.

В самом деле, если мы смешиваем единичные цвета, то, поскольку для них $r' = g' = b'$, координаты цветности $r = g = b = 1/3$, т. е. точка, соответствующая белому цвету E^* , расположена в центре цветового треугольника. В вершинах цветового треугольника, как было указано, расположены спектральные цвета R , G и B .

Можно доказать математически, что цвета, получающиеся в результате смешения двух цветов, расположены в цветовом треугольнике на прямой линии, соединяющей точки, соответствующие смешиваемым цветам.

Таким образом, на сторонах цветового треугольника располагаются цвета, получающиеся в результате смешения расположенных в вершинах основных цветов R , G и B попарно. На биссектрисах треугольника располагаются цвета, получающиеся при смешении каждого из основных цветов с белым цветом E , расположенным в центре.

Для того чтобы нанести на цветовой треугольник положение всех остальных спектральных цветов, необходимо знать значение координат цветности r , g и b для всех спектральных цветов. Значения эти были получены в результате лабораторных исследований, которые заключались в уравнении цвета двух полей сравнения при освещении одного из них последовательно спектральными (монохроматическими) излучениями всей видимой области спектра через 5 нм, а второго комбинациями основных цветов R , G и B .

На рис. 16 представлен цветовой треугольник с нанесенной линией спектральных цветов по данным этих исследований. Цифрами вдоль линии спектральных цветов указаны длины волн в нанометрах соответствующих спектральных цветов. Все спектральные цвета, за исключением основных цветов R , G и B , расположены вне цветового треугольника и, следовательно, для каждого из них одна из координат цвета отрицательна.

Такой график, на котором расположены все существующие цвета, носит название цветового графика.

На линии, соединяющей красный цвет с длиной волны 700 нм и фиолетовый цвет с длиной волны 400 нм, расположены чистые пурпурные цвета. Таким образом, цветности всех существующих

* Источнику белого света E соответствует равномерное спектральное распределение энергии; он носит название равноэнергетического.

цветов располагаются на цветовом графике на площади, ограниченной кривой спектральных цветов и прямой линией пурпурных цветов.

Предположим, что мы имеем некоторую поверхность, которая освещается люминесцентной лампой. Нужно рассчитать цвет C_1 этой поверхности по заданному распределению энергии в спектре люминесцентной лампы и кривой спектрального отражения поверхности. Имея указанные данные, можно рассчитать координаты¹ цвета r' , g' и b' , а по ним, пользуясь выражениями (4), координаты цветности r , g и b цвета C_1 . Зная координаты цветности, можно нанести цвет C_1 на цветовой график (рис. 16).

Проведем прямую линию, соединяющую белый цвет E с цветом C_1 до пересечения с линией спектральных цветов. На этой прямой линии будут расположены цвета, которые получаются при смешении в разных пропорциях спектрального цвета с цветовым тоном λ_1 и белого цвета E . Одним из таких цветов является цвет C_1 .

Все цвета, расположенные на прямой линии $\lambda_1 E$, имеют одинаковый цветовой тон λ_1 , но отличаются друг от друга по степени разбавленности белым цветом, т. е. по чистоте цвета. Чем ближе к точке белого цвета E расположен данный цвет, тем меньше его чистота. В точке белого цвета E чистота цвета с любым цветовым тоном равна нулю. На линии спектральных цветов чистота цвета равна 100%. Наиболее чистым пурпурным цветам, не являющимся спектральными цветами, условно приписывается чистота цвета, равная 100%.

Для цвета C_1 чистота цвета больше нуля и меньше 100%. Она определяется отношением светового потока спектрального цвета к сумме световых потоков спектрального и белого цветов, которые надо смешать, чтобы получить данный цвет.

Цветовой график наглядно показывает, что любой цвет, имеющий чистоту цвета меньше 100%, т. е. не являющийся спектральным цветом, может быть получен смешением бесчисленного множества пар цветов. Чтобы убедиться в сказанном, проведем мысленно через точку C_1 , характеризующую собой определенный цвет, ряд прямых линий под различными углами к оси ординат. Про-

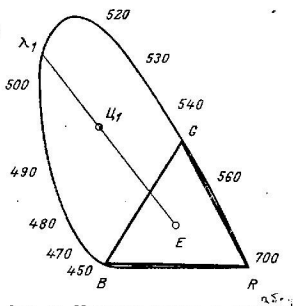


Рис. 16. Цветовой график в системе определения цвета RGB.

¹ Изложение методов расчета координат цвета не входит в задачу настоящей книги. С методами расчета координат цвета можно познакомиться в книгах: С. О. Майзель и Е. С. Ратнер. Цветовые расчеты и измерения; М. М. Гуревич. Цвет и его измерение [Л. 6, 13].

должим все эти прямые до пересечения с линией спектральных цветов. Каждая линия пересечет кривую спектральных и чистых пурпурных цветов 2 раза. Любые два цвета, расположенные на каждой из прямых, один из которых расположен по одну сторону, а другой по другую сторону от цвета C_1 , при смешении в некоторой определенной пропорции дадут заданный цвет C_1 .

Все сказанное относится и к белому цвету, который также может быть получен смешением множества пар цветов. Эти пары цветов, как мы уже знаем, являются дополнительными цветами. На цветовом графике дополнительные цвета располагаются на прямых линиях, пересекающих точку белого цвета E .

Предположим, что нужно рассчитать цвет смеси двух спектральных цветов. Для этого надо соединить прямой линией точки на цветовом графике, соответствующие этим спектральным цветам. Все точки этой прямой будут характеризовать цвета смеси этих двух спектральных цветов, взятых в разных пропорциях. Поскольку для большинства пар спектральных цветов такие прямые представляют собой хорды, то это означает, что при смешении большинства пар спектральных цветов получаются цвета с чистотой цвета, меньшей 100%, т. е. неспектральные цвета. Только спектральные цвета, расположенные на практически прямолинейном участке линии спектральных цветов от 700 (красный цвет) до 575 нм (желтый цвет), образуют при смешении оранжевые цвета, не отличимые от спектральных. Об этом мы уже говорили в одном из предыдущих разделов, и это подтверждается цветовым графиком.

Для расчета цвета смеси двух цветов C_1 и C_2 на цветовом графике нужно знать суммы координат цвета смешиваемых цветов. Расстояние между точками на цветовом графике, характеризующими смешиваемые цвета, делится на столько частей, сколько единиц содержится в сумме координат цвета смешиваемых цветов. Затем от точки цвета C_2 откладывается число единиц, содержащихся в сумме координат цвета первого цвета C_1 . Полученная точка и будет точкой цвета смеси цветов C_1 и C_2 . Если требуется произвести на цветовом графике смешение трех цветов, то сначала нужно найти результат смешения двух цветов, а затем произвести смешение суммы двух первых с третьим цветом. Точно так же можно найти результат смешения любого числа цветов.

Таким образом, многие свойства цветов, которые были обнаружены экспериментально, очень просто и наглядно объясняются с помощью цветового графика.

Цветовая система, построенная на определении заданного цвета через три основных цвета — красный, зеленый и синий, смешанных в определенной пропорции, дает возможность разрешить все вопросы, связанные с расчетом цвета.

Однако наличие в этой системе отрицательных координат цветности значительно усложняет цветовые расчеты.

Приведенный на рис. 16 цветовой график построен при основных цветах R , G и B , длины волн излучений которых составляют

700, 546,1 и 435,8 нм соответственно. Можно было бы построить цветовой график, взяв в качестве основных цветов красный, зеленый и синий цвета других длин волн или любые три цвета, являющиеся взаимно независимыми. Однако этим мы не смогли бы освободиться от отрицательных координат цветности, так как цветовой треугольник, построенный на основе новых красного, зеленого и синего цветов, все равно находился бы внутри линии спектральных и чистых пурпурных цветов и касался бы линии спектральных цветов только в точках, соответствующих основным цветам.

Таким образом, не представляется возможным построить цветовую систему, в которой отсутствовали бы отрицательные координаты цветности, путем применения в качестве основных цветов любых монохроматических излучений.

Недостатки изложенной выше системы определения цвета заставили ученых работать над созданием более совершенной системы, свободной от указанных недостатков.

В 1931 г. Международная комиссия по освещению утвердила новую колориметрическую систему определения цвета XYZ .

Эта система, как и предыдущая, построена на основе трех основных цветов X , Y и Z , являющихся в этой системе единичными.

Цвета X , Y и Z располагаются на цветовом графике системы RGB , как это указано на рис. 17. Из рис. 17 видно, что вся область существующих цветов заключена внутри треугольника, в вершинах которого расположены основные цвета X , Y и Z .

Основные цвета X , Y и Z могут быть выражены через основные цвета R , G и B .

Поскольку область существующих цветов расположена внутри треугольника XYZ , то эти цвета выражаются через основные цвета X , Y и Z так, что все координаты цветности для существующих цветов положительны. Выражения основных цветов X , Y и Z через основные цвета R , G и B осуществляются путем ряда математических преобразований.

Поскольку выражения для X , Y и Z получаются путем преобразования уравнений в колориметрической системе RGB , то цветовое уравнение независимо от того, какими являются основные цвета X , Y и Z , описывает процесс смешения существующих цветов.

Поэтому единицам X , Y и Z не следует придавать никакого другого смысла, кроме расчетного. Любой существующий цвет C выражается в цветовой системе XYZ следующим образом:

$$C \equiv x'X + y'Y + z'Z.$$

(6)

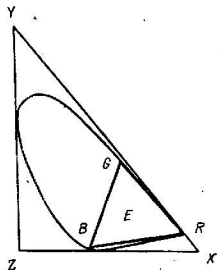


Рис. 17. Расположение основных цветов X , Y и Z на цветовом графике системы RGB .

Здесь, так же как и в предыдущей колориметрической системе RGB , x' , y' и z' являются координатами цвета. Координаты цветности x , y и z в цветовой системе XYZ выражаются через координаты цвета:

$$\left. \begin{aligned} x &= \frac{x'}{x' + y' + z'}; \\ y &= \frac{y'}{x' + y' + z'}; \\ z &= \frac{z'}{x' + y' + z'}; \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

$$x + y + z = 1, \quad (8)$$

На основании значений координат цветности r , g и b были вычислены координаты цветности в колориметрической системе XYZ для всех спектральных цветов.

Из равенства (8) следует, что независимыми являются только две из трех координат цветности.

Если будем в системе прямоугольных координат по оси ординат откладывать одну из координат цветности, а по оси абсцисс другую и сделаем это для всех спектральных и наиболее чистых пурпурных цветов, то получим цветовой график в колориметрической системе XYZ .

В колориметрической системе XYZ общепринятым является цветовой график, по оси ординат которого откладываются координаты цветности y , а по оси абсцисс x .

На рис. 18 приведен цветовой график в Международной колориметрической системе XYZ в том виде, в каком он применяется для цветовых расчетов, а на рис. VI — этот же цветовой график, выполненный в цветах.

В середине графика расположен белый цвет E . Вдоль линии спектральных цветов указаны длины волн в нанометрах, соответствующие отдельным спектральным цветам. На прямых линиях, соединяющих белый цвет E со спектральными цветами, располагаются цвета, получающиеся смешением спектральных цветов с белым цветом.

Для упрощения расчетов цветности на цветовом графике нанесены кривые линии одинаковой чистоты цвета. Для всех точек графика, лежащих на одной кривой, чистота цвета одинакова. Кривые одинаковой чистоты цвета соответствуют значениям чистоты цвета 10, 20, 30 и т. д. до 100%. Последнее значение чистоты цвета соответствует спектральным цветам.

Вдоль линии чистых пурпурных цветов указаны значения длин волн (со штрихом) цветов, дополнительных к соответствующим пурпурным цветам.

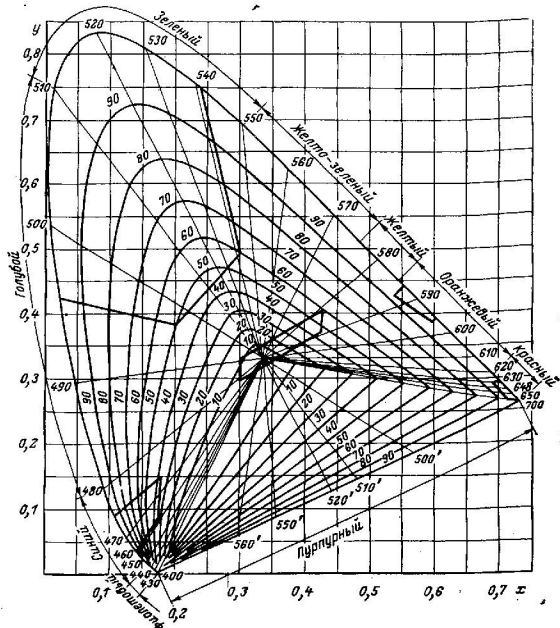


Рис. 18. Цветовой график в Международной колориметрической системе XYZ.

Определив имеющимися методами координаты цвета x' , y' и z' данного цвета, по ним определяют координаты цветности x , y и z [формулы (7)]. Откладывая по осям ординат и абсцисс цветового графика значения x и y , находят точку, соответствующую цветности данного цвета.

Проведя прямую линию из точки белого цвета E через точку с найденной цветностью до пересечения с линией спектральных цветов, можно определить цветовой тон λ , а по кривым одинаковых значений чистоты — чистоту цвета p .

Таким образом, любой цвет может быть изображен точкой на цветовом графике и охарактеризован цветовым тоном и чистотой цвета.

Зная спектральные коэффициенты отражения поверхности тела и распределение энергии в спектре источника света, освещающего поверхность тела, мы можем рассчитать цвет этой поверхности при данном освещении¹ (правильнее, цвет излучения, отраженного поверхностью). Если источниками света являются лампа накаливания или солнце, имеющие непрерывный спектр, то расчет цвета занимает достаточно много времени.

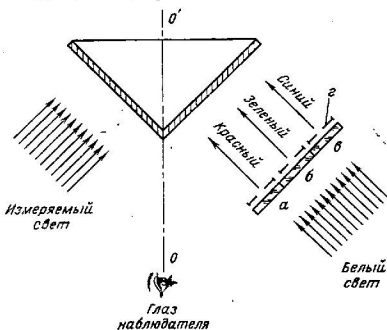


Рис. 19. Схема аддитивного зрительного колориметра.

а — красный светофильтр; б — зеленый светофильтр; в — синий светофильтр; г — непротравливающие заслонки с переменной степенью закрытия.

Так как обычно кривые спектрального отражения поверхности или распределения энергии в спектре источника света неизвестны, то время, необходимое для определения цвета, значительно увеличивается. Это связано с тем, что снятие указанных спектральных характеристик поверхности и источника света является делом отнюдь не простым и требует специальной аппаратуры и опыта.

Естественно возникает вопрос: может ли быть измерен непосредственно данный цвет? Приборы для непосредственного измерения цвета существуют и называются колориметрами.

Колориметры бывают зрительные и фотоэлектрические. Зрительные колориметры основаны на уравнивании по цвету двух полей сравнения, расположенных рядом и разделенных тонкой линией. Зрительные колориметры бывают аддитивными и субтрактивными. Аддитивные колориметры основаны на получении любого цвета путем смешения в определенных количествах трех постоянных по

¹ То же самое относится и к среде, но тогда нужно знать спектральные коэффициенты пропускания.

качеству цветных световых потоков — красного, зеленого и синего. Субтрактивные колориметры основаны на явлении вычитания цветов.

Одно поле аддитивного зрительного колориметра освещается измеряемым светом, а второе — одновременно тремя световыми потоками — красным, зеленым и синим.

На рис. 19 приведена принципиальная схема аддитивного зрительного колориметра. Красный, зеленый и синий световые потоки получаются пропусканием светового потока лампы накаливания через красный, зеленый и синий светофильтры. Изменение красного, зеленого и синего световых потоков, падающих на одно из полей сравнения, осуществляется с помощью заслонок с переменной степенью закрытия. Эти заслонки установлены перед каждым из светофильтров. Чем большую поверхность светофильтра перекрывает заслонка, тем меньший световой поток этого цвета падает на соответствующее поле сравнения.

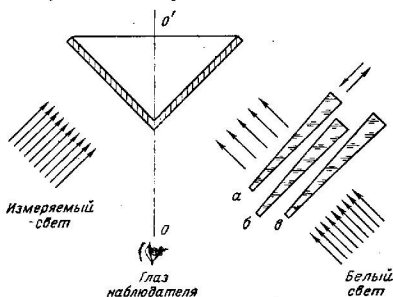


Рис. 20. Схема субтрактивного зрительного колориметра.

а — пурпурный клин; *б* — желтый клин; *в* — голубой клин.

Изменяя соотношение красного, зеленого и синего световых потоков, можно добиться равенства обоих полей сравнения по цветности и яркости, следовательно, по цвету. Степень закрытия заслонками светофильтров может быть прочитана по шкалам колориметра. Показания шкал прибора при цветовом равенстве обоих полей сравнения позволяют рассчитать координаты цветности измеряемого излучения, пользуясь предварительно сделанной градуировкой.

В субтрактивных колориметрах цветового равенства обоих полей сравнения добиваются иным, чем в аддитивных колориметрах, путем. Так же как и в аддитивных зрительных колориметрах, одно из полей сравнения субтрактивного колориметра освещается световым потоком, цвет которого требуется определить. Второе поле сравнения освещается лампой накаливания, перед которой уста-

новлены один за другим несколько цветных стеклянных клиньев с переменной толщиной (рис. 20). Передвигая цветные клинья перпендикулярно направлению пучка света лампы накаливания, мы изменяем толщину каждого из клиньев, через которые проходит световой поток лампы. Вследствие изменения толщины клин-

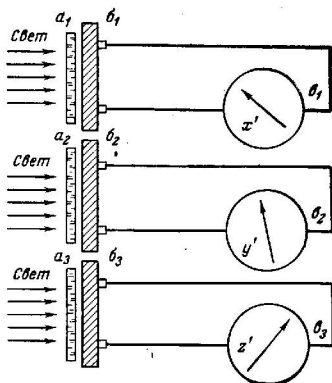


Рис. 21. Принципиальная схема фотоэлектрического колориметра.

a_1, a_2, a_3 — светофильтры; $б_1, б_2, б_3$ — фотоэлементы; $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ — гальванометры.

измерение цвета ведется глазом. В фотоэлектрических колориметрах роль глаза выполняют фотоэлементы. При освещении активной поверхности фотоэлемента светом в его цепи появляется электрический ток. Это свойство фотоэлементов и используется в фотоэлектрических колориметрах.

Принципиальная схема фотоэлектрического колориметра представлена на рис. 21. Световой поток, цвет которого требуется измерить, направляется на систему из трех фотоэлементов. Каждый из фотоэлементов соединен с чувствительным гальванометром. При протекании электрического тока в цепи фотоэлемента стрелка гальванометра отклоняется. Перед каждым из фотоэлементов устанавливается специальный корректирующий светофильтр. Кривые спектрального пропускания этих светофильтров подбираются таким образом, чтобы отклонения стрелок гальванометров фотоэлементов были пропорциональны координатам цвета x', y' и z' .

Определив x', y' и z' , мы по ним вычисляем координаты цветности и при необходимости находим цветовой тон λ и чистоту цвета p с помощью цветового графика.

ев изменяется цветность светового потока лампы накаливания после прохождения через все цветные клинья. При некотором положении цветных клиньев получается цветовое равенство полей сравнения. По шкалам, которые связаны с перемещающимися цветными клиньями, могут быть сделаны отсчеты. По полученным отсчетам и имеющейся градуировке может быть определен искомый цвет. Субтрактивные колориметры мало применяются на практике, так как они значительно сложнее в употреблении, чем аддитивные колориметры, и менее точны.

Фотоэлектрические колориметры основаны на совершенно ином принципе, чем зрительные колориметры. В зрительных колориметрах

Измерение, цвета на фотоэлектрическом колориметре производится с большой точностью и требует незначительного времени.

Вместо трех фотоэлементов можно взять один фотоэлемент. В этом случае три корректирующих светофильтра должны попеременно ставиться перед фотоэлементом. Так же как и раньше, отклонения стрелки гальванометра пропорциональны x' , y' и z' .

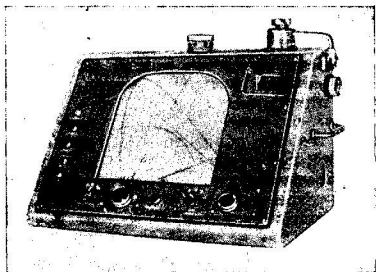


Рис. 22. Колориметр ВНИСИ с непосредственным отсчетом типа КНО-3.

В настоящее время большое применение имеют фотоэлектрические колориметры, используемые для цветовых и других измерений в разнообразных областях науки и техники и во многих отраслях промышленности.

В качестве приемников света в фотоэлектрических колориметрах используются селеновые фотоэлементы, вакуумные фотоэлементы и фотоумножители с висмута-серебряно-цезиевыми или многощелочными фотокатодами.

Широко применяются универсальный фотоэлектрический колориметр типа УФК-2 для измерения характеристик просвечиваемых и непрозрачных материалов и изделий, а также фотоэлектрический колориметр с непосредственным отсчетом типа КНО-3 (рис. 22) для измерения характеристик прозрачных и непросвечиваемых плоских образцов.

Для измерения цветовых и других характеристик экранов телевизионных кинескопов в цветном телевидении (а также черно-белом) используются специальные телевизионные электронные и фотоэлектрические колориметры типов ТК-5 и ТФК-5.

Все указанные и ряд других типов фотоэлектрических колориметров и колориметрических установок (см. разд. «Цвет в производстве») разработаны Всесоюзным научно-исследовательским светотехническим институтом (ВНИСИ). С помощью указанных выше колориметров цвет определяется в одной из колориметрических систем либо непосредственно на приборе. Нанося координаты

цветности на цветовой график, можно при необходимости определить цветовой тон и чистоту цвета объекта измерения.

Однако предельная точность работы даже фотоэлектрического колориметра ограничена точностью воспроизведения с помощью светофильтров требуемых кривых спектральной чувствительности приемников, вариациями спектральных характеристик источников и приемников излучения и нелинейностью усилительных схем. В связи с этим чувствительность фотоэлектрических колориметров оказывается недостаточной для определения малых цветовых различий.

При необходимости измерения малых цветовых различий используются специальные фотоэлектрические приборы, носящие название компараторов¹ цвета. Электронный компаратор цвета типа ЭКЦ-1 находит применение для определения цветовых характеристик плоских твердых образцов в текстильной, полиграфической, лакокрасочной, кожевенной, бумажной, керамической и других отраслях промышленности, где требуется высокая степень одноцветности выпускаемых изделий.

Фотоэлектрический компаратор цвета типа ФКЦШ предназначен для измерения малых цветовых различий между испытуемым образцом и соответствующим эталоном и пригоден для измерения твердых и жидких образцов.

Бывают случаи в практической работе, когда требуется определение цвета той или иной поверхности при отсутствии колориметра, и тогда применяется упрощенный способ определения цвета с помощью атласа цветов.

Атласом цветов называется альбом, в котором собрано большое число цветных и ахроматических красок, расположенных в определенном порядке. На каждой странице размещены накраски одного цветового тона, но различной чистоты цвета. В таблицах приводятся характеристики каждой накраски (цветовой тон, чистота цвета и суммарный коэффициент отражения).

С накрасками атласа цветов может быть сравнен цвет который требуется определить. При сравнении выбирается та накраска, которая имеет цвет, наиболее близкий к цвету измеряемой поверхности. Цветовые характеристики этой накраски могут быть приняты в качестве приблизительных цветовых характеристик измеряемой поверхности.

Цветовые атласы имеют довольно большое распространение. Так, с 1780 по 1956 г. в разных странах было издано более двадцати различных цветовых шкал и атласов цветов. Некоторые из них многократно переиздавались. Наибольшее распространение получили цветовые атласы Оствальда и Менселла. Однако недостатком этих атласов является то, что в них цветность определяется некоторыми условными цифровыми обозначениями. Таким образом, в этих атласах нельзя получить результат измерения в Международной колориметрической системе XYZ.

¹ Компараторами называются измерительные приборы, в которых измеряемая величина сравнивается с эталонной.

В 1937 г. Всесоюзной академией архитектуры был выпущен атлас архитектурных цветов, в котором были приведены накраски архитектурных цветов и даны их характеристики и рецепты. Атлас архитектурных цветов в основном был предназначен для стандартизации рецептов архитектурных красок, но не для определения цветов.

В 1948 г. был издан атлас архитектурных цветов В. В. Чернова. Оригинальный атлас цветов, разработанный Е. Б. Рабкиным, издан у нас в 1956 г. Этот атлас цветов отличается тем, что все имеющиеся в нем цветные поля характеризуются координатами цветности в системе XYZ и для них одновременно даются цветовой тон и чистота цвета, а также коэффициенты отражения. Цветные таблицы представлены в атласе двумя сериями таблиц для двенадцати цветовых тонов. Обе серии совершенно одинаковы по составу и отличаются друг от друга только формой цветных полей. В первой серии цветные поля даны в виде сплошных кружков, а во второй — в виде полукружков с полукруглыми сквозными вырезами для возможности непосредственного сравнения измеряемых образцов с полями атласа.

Область применения цветовых измерений весьма широка.

Цветовым измерениям подвергают всевозможные источники света, светофильтры, применяемые в самых разнообразных областях техники, естественные земные покровы, ткани, архитектурные накраски, некоторые продукты питания, различные цветные растворы, бумажные изделия, керамику и др.

Есть основания предполагать, что в дальнейшем область применения цветовых измерений будет значительно расширена.

ЦВЕТ В ПРОИЗВОДСТВЕ

Рациональное цветовое оформление производственных помещений. Современный уровень развития техники предъявляет все большие требования к работе органа зрения человека в процессе трудовой деятельности. Это связано с необходимостью обеспечить наиболее благоприятные условия для работы органа зрения, что способствует уменьшению зрительного и цветового утомления и повышению работоспособности.

Особое значение вопрос рационального цветового оформления имеет для производственных помещений, рабочих мест и оборудования, поскольку это также способствует резкому уменьшению травматизма, уменьшению простоев оборудования и др.

Наука о рациональном цветовом оформлении производственных помещений начала развиваться в тридцатых годах XX столетия усилиями физиологов, светотехников, архитекторов, художников и производственников.

Многочисленными исследованиями отечественных и зарубежных ученых, а также большим практическим опытом установлено, что цвет окружающих объектов имеет очень большое значение

для производственной деятельности человека и его психологического состояния в процессе трудовой деятельности.

Установлено, что цвета различных участков видимой области спектра различной чистоты и яркости оказывают неодинаковое воздействие на человека. В связи с этим проблемой, имеющей **большое** теоретическое и практическое значение, является применение для цветового оформления производственных, а также других помещений рациональных цветов, оказывающих наибольшее стимулирующее воздействие на человека.

На основе значительных теоретических и экспериментальных исследований в области рационального цветового оформления производственных помещений [Л. 17] установлены три группы цветов, рекомендуемые для этих целей.

Первую группу составляют оптимальные цвета, рекомендуемые для окраски больших поверхностей (полей адаптации), к которым относятся цвета (всего 27 цветов) средневолновых участков видимой области спектра (оранжевые, желтые, желто-зеленые, зеленые, зелено-голубые, голубые, сине-голубые и др.) с относительно небольшой чистотой цвета порядка 15—40% для разных цветов и высоким коэффициентом отражения [Л. 17].

Ко второй группе относятся вспомогательные цвета (всего 18 цветов), рекомендуемые для окраски малых поверхностей, к которым относятся: красный, оранжевый, желтый, желто-зеленый, зелено-голубой и другие цвета с чистотой цвета порядка 24—50% для разных цветов и средним коэффициентом отражения, а также серые цвета с коэффициентом отражения 40—60% [Л. 17].

К третьей группе относятся цвета, называемые **предохранительными** цветами, рекомендуемыми для окраски открытых трубопроводов, приборов и устройств, неправильное обращение с которыми может привести к несчастным случаям. К этой группе относятся 18 цветов: красный, оранжевый, желтый, зеленый, голубой, синий, фиолетовый и другие цвета, имеющие относительно высокую чистоту цвета порядка 30—60% для разных цветов и коэффициент отражения не менее 50% [Л. 17].

Указанные выше три группы цветов, состоящие из 63 цветов, дают возможность решить задачи цветового оформления для большинства практически встречающихся объектов. В отдельных специальных случаях могут потребоваться дополнительно оттенки, не включенные в указанные группы.

По данным, опубликованным разными авторами как у нас в стране, так и за рубежом, применение рациональной окраски производственных помещений, рабочих мест и оборудования приводит к повышению производительности труда на 10—15%, к снижению непроизводительных потерь рабочего времени до 20—25%, к уменьшению количества несчастных случаев и травм на 40—50%, к резкому снижению утомляемости рабочих.

Цветопередача. Мы уже знаем, что чувствительность глаза к излучениям видимой области спектра различна и максимальна для излучения с длиной волны 555 нм (желто-зеленый цвет). Не

случайно, что чувствительность глаза максимальна для средней части видимой области спектра. Измерения распределения энергии в спектре солнца показывают, что наибольший процент излучения в пределах видимой области спектра приходится на желто-зеленые излучения, к которым чувствительность глаза наибольшая. Таким образом, за многие тысячелетия глаз человека приспособился к излучению солнца.

Цвета предметов мы привыкли оценивать в условиях естественного (солнечного) освещения.

В самом деле, представим себе лист чертежной бумаги, освещенный рассеянным солнечным светом. Он белого цвета.

Этот же лист бумаги вечером при освещении лампами накаливания мы также считаем белым, хотя в действительности его цвет значительно отличается от белого цвета и является желтоватым. В этом легко убедиться, если поместить рядом два одинаковых листа чертежной бумаги и осветить один из них светом люминесцентной лампы дневного света, а второй лампой накаливания.

Любой источник света можно оценить, сравнивая цвета поверхностей, освещаемых этим источником света, с цветами этих же поверхностей при естественном освещении.

Такую оценку источника света называют его цветопередачей.

Однако естественное освещение изменяется в широких пределах. Так, например, свет прямых солнечных лучей значительно отличается от солнечного света, рассеянного облаками. Естественный свет, падающий на землю, зависит от времени дня и от состояния погоды.

Поэтому вместо меняющегося естественного света в качестве источников сравнения пользуются специальными стандартными источниками белого цвета, цвет которых практически не изменяется.

Поскольку цвета поверхностей, освещенных данным источником света, мы можем сравнивать с их цветом при освещении прямыми солнечными лучами или светом облачного неба, то необходимо иметь такие стандартные источники белого цвета, которые давали бы излучение в видимой области спектра, приближающееся к нужному дневному свету.

Международным соглашением для указанных целей были приняты два стандартных источника белого света. Первый из них называется источником В и представляет собой лампу накаливания в совокупности с жидкостным светофильтром голубого цвета. Цвет светового потока источника В соответствует цвету прямых солнечных лучей.

Второй называется источником С и представляет собой совокупность той же лампы накаливания и другого жидкостного светофильтра более голубого цвета.

Цвет светового потока источника С соответствует цвету рассеянного облаками солнечного света.

В обычных условиях цвета поверхностей оцениваются нами при освещении рассеянным дневным светом, поэтому при опреде-

лении цветопередачи данного источника света сравнение проводят применительно к стандартному источнику белого света С.

Если цвет поверхности, освещаемой каким-либо источником света, соответствует цвету этой же поверхности, освещаемой источником С, то его цветопередача считается правильной. Расчет и оценка цветопередачи осуществляются по специальной методологии.

Цветопередача в осветительных установках. Привычным для практики внутреннего освещения промышленных, жилых и общественных зданий является требование создания освещенностей, удовлетворяющих нормам.

Однако в ряде случаев к освещению, кроме высоких освещенностей, предъявляется еще требование получения правильной цветопередачи. Требование получения правильной цветопередачи возникает там, где зрительная работа связана с тонким различением цвета предметов в процессе производства и контроля готовой продукции. Это относится, например, к текстильной, лакокрасочной, анилинокрасочной, меховой, полиграфической, табачной и другим отраслям промышленности. В указанных отраслях промышленности в процессе производства и контроля качества продукции необходимо правильное различение цвета.

Требования получения правильной цветопередачи предъявляются также к освещению картинных выставок и галерей, художественных мастерских и т. д.

В течение долгого времени проблема получения искусственного света, приближающегося по спектральному составу к дневному свету, не могла быть практически удовлетворительно решена. Предлагавшиеся решения не удовлетворяли практике освещения с экономической и эксплуатационной точек зрения, не говоря уже о том, что и качественно эти решения были неудовлетворительны.

Одним из таких решений было применение ламп накаливания с колбами из голубого стекла. Световой поток раскаленной до высокой температуры вольфрамовой нити имеет в своем составе большой процент желтых, оранжевых и красных излучений и значительно меньше зеленых, синих и фиолетовых. Зеленые, синие и фиолетовые лучи проходят сквозь голубое стекло колбы лампы почти без изменения. Желтые, оранжевые и красные излучения значительно поглощаются голубым стеклом. Таким образом, соотношение между указанными группами цветов несколько уравнивается и суммарное излучение становится менее желтым. Такие лампы мало экономичны, так как голубое стекло поглощает значительную часть светового потока нити.

Проблема получения искусственного света, почти не отличающегося от естественного дневного света, была решена созданием новых источников света — люминесцентных ламп.

В СССР люминесцентные лампы были созданы в 1938 г. в результате большой работы, проведенной под руководством акад. С. И. Вавилова. Эти лампы работают на совершенно ином принципе, чем лампы накаливания.

Наша электроламповая промышленность выпускает люминесцентные лампы, приближающиеся по спектральному составу к рассеянному солнечному свету (лампа дневного света ЛД), к прямым солнечным лучам (лампы белого света ЛБ), а также холодно-белого (ЛХБ), тепло-белого (ЛТБ) и дневного света с улучшенной цветопередачей (ЛДЦ). Люминесцентные лампы могут быть получены любого спектрального состава.

До появления люминесцентных ламп работа, требующая правильного различения цветов и тонких оттенков, производилась только в светлое время суток при дневном освещении. Следовательно, рабочий день на этих операциях был значительно короче, чем на операциях, где правильного различения цвета не требовалось. Таким образом, участки работы, требовавшие правильного различения цвета, тормозили весь технологический процесс производства. Особенно сильно это сказывалось зимой, когда светлое время суток значительно короче темного.

Для обеспечения планового выпуска готовой продукции приходилось увеличивать число рабочих, занятых на операциях, где требовалось правильное различение цвета. Это приводило к увеличению рабочих площадей цехов и, следовательно, к излишнему увеличению капитальных затрат.

Теперь же при наличии люминесцентных ламп, дающих правильную цветопередачу, работа на операциях, требующая правильного различения цвета, производится без ущерба для качества в вечернее и ночное время. Таким образом, применение люминесцентных ламп дало возможность на предприятиях указанных отраслей промышленности перейти на многосменную работу. Следует указать, что, обладая правильной цветопередачей, люминесцентные лампы дневного света в 3—4 раза экономичнее ламп накаливания и имеют значительно больший срок службы.

Нормирование и определение сортности. Представим себе производство цветных светофильтров. Цветные светофильтры находят широкое применение во многих областях техники. Они применяются в сигнализации на железнодорожном, авиационном, водном и городском транспорте, в цветной и черно-белой фотографии, в цветном кино, в цветном телевидении, в театральных осветительных установках, в многочисленных измерительных приборах и т. д.

Во многих из перечисленных выше областей техники требуется, чтобы цветные светофильтры удовлетворяли определенным нормам. Это означает, что разброс цветовых характеристик светофильтров данного цвета и назначения не должен выходить из заданных пределов.

Естественно, осуществить контроль цвета светофильтров на глаз невозможно, он может быть осуществлен с помощью колориметра.

Если на цветовом графике в системе XYZ изобразить точками предельно допустимые значения цветности для светофильтров данного цвета и назначения и соединить их прямыми линиями, то получим некоторый замкнутый многоугольник.

Светофильтры, значения цветности которых не выходят за пределы многоугольника, считаются удовлетворяющими нормам.

В ответственных случаях проверяют все изготавливаемые светофильтры, а в менее ответственных контролируют партию путем выборки определенного процента светофильтров.

Такой контроль соответствия цвета выпускаемых изделий нормам производится не только при производстве светофильтров, но также в лакокрасочной, полиграфической, текстильной, кожевенной, бумажной и многих других отраслях промышленности.

В ряде приведенных выше областей техники цвет является основным критерием для определения сортности продукции.

На этом принципе основано также определение сортности некоторых пищевых продуктов. Раньше определение сортности этих продуктов производилось на глаз.

В качестве примера установок и приборов для контроля цветности в процессе производства можно указать на колориметрические установки типа УКЛ и УКЛ-2 контроля цветности люминесцентных ламп различной мощности и цвета. Для контроля цветности излучения источников света применяются колориметр КИНИ-1 и колориметрическая головка КГ-2. Контроль цветности экранов телевизионных цветных и черно-белых кинескопов осуществляется в процессе производства колориметрами ТК-2 и ТК-4.

Цвет в количественном химическом анализе. Во многих отраслях промышленности большое значение имеет определение содержания тех или иных элементов в составе веществ, подвергающихся анализу. Встречается необходимость определения содержания железа в алюминии, в меди и в других веществах, фосфорной кислоты в удобрениях, ртути в воздухе, мышьяка в чугунах и т. д.

Оптический метод анализа заключается в следующем. Вещество, подвергающееся анализу, если оно является твердым телом или газом, растворяют в кислоте или какой-нибудь другой жидкости. Затем элемент, содержание которого определяют, переводят с помощью соответствующего реактива в окрашенное соединение и по степени окраски, пользуясь специальными приборами, судят о количественном содержании искомого элемента в данном веществе. Если подвергающееся анализу вещество является бесцветной жидкостью, то искомым элемент сразу переводят в окрашенное соединение. Определение концентрации окрашенных растворов (раствор медного купороса в воде и т. д.) производится непосредственно по степени окраски раствора.

Оптический метод определения концентрации веществ по степени окраски растворов имеет ряд преимуществ по сравнению с весовым методом, в котором определяемые элементы подвергаются взвешиванию после их выделения. Оптический метод анализа дает возможность значительно быстрее, чем весовой метод, определить содержание искомых элементов. Являясь более чувствительным, оптический метод дает возможность определять содержание даже очень малых количеств искомых элементов порядка сотых долей миллиграмма, что весовым способом достигнуто быть не может.

Оптический метод количественного химического анализа был впервые применен акад. М. В. Северегиным в 1795 г. для определения содержания железа в минеральных водах. В дальнейшем русские ученые во многом способствовали развитию этого метода анализа. Особенно широко оптический метод анализа стал применяться в СССР в период индустриализации страны.

Приборы, служащие для определения концентрации окрашенных растворов, носят название концентрационных колориметров¹. Эти колориметры бывают зрительными и фотоэлектрическими.

Принципиальное устройство зрительного концентрационного колориметра показано на рис. 23. Имеются два вертикально расположенных цилиндрических сосуда, в один из которых наливается измеряемый раствор, а во второй — раствор с известной концентрацией. Специальное устройство позволяет отдельно изменять высоту столбов обоих растворов и отсчитывать ее по шкалам. Под сосудами для жидкостей расположен осветитель. Световой поток осветителя проходит через оба столба окрашенных жидкостей. После прохождения жидкостей свет проходит через призмы P_1 и P_2 , расположенные над обоими сосудами, и попадает в окуляр O . Смотря в окуляр глазом, мы видим два поля сравнения. Одно создается при прохождении светового потока через испытуемый раствор, а второе через раствор с известной концентрацией. Изменяя высоту столбов жидкостей таким образом, чтобы раствор с меньшей концентрацией имел большую высоту столба, можно добиться равенства обоих полей сравнения по цвету. Далее по известной концентрации одного из растворов c_1 и высоте столбов обоих растворов l_1 и l_2 , отсчитанных по шкалам прибора, определяют концентрацию второго раствора c_2 по формуле

$$c_2 = c_1 \frac{l_1}{l_2}$$

В настоящее время на практике в случаях, когда визуальный метод измерения концентрации вещества по точности отвечает требованиям, находит применение зрительный концентрационный колориметр типа КОЛ-52. Уравнивание в нем световых потоков осуществляется с помощью фотометрического клина. Прибор

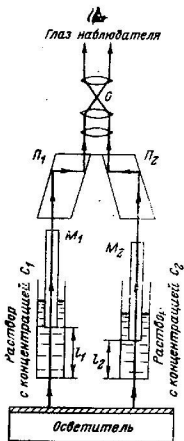


Рис. 23. Схема зрительного концентрационного колориметра.

O — окуляр; P_1 и P_2 — призмы; M_1 и M_2 — подвижные цилиндры из оптического стекла, позволяющие изменять высоту столбов жидкостей l_1 и l_2 .

¹ Приборы для измерения концентрации окрашенных жидкостей иногда неправильно называют колориметрами.

снабжен комплектом светофильтров и может быть использован для спектрофотометрических целей.

Широкое применение для точного измерения концентрации вещества, в частности для массовых химических анализов, находят фотоэлектрические концентрационные колориметры типа ФЭК-М и ФЭК-56. Роль глаза в этих приборах выполняют фотоэлементы. С помощью прибора типа ФЭК-М измерения можно вести в пределах видимой области спектра, а прибор типа ФЭК-56 дает возможность вести измерения как в видимой, так и в ультрафиолетовой области спектра (313—630 нм).

ЦВЕТ В СВЕТОВОЙ СИГНАЛИЗАЦИИ

Современная сигнализация на всех видах транспорта (железнодорожном, городском, авиационном и водном) осуществляется с помощью цветных световых сигналов.

В разных видах транспорта используется различное количество цветных световых сигналов в соответствии с требованиями эксплуатации.

Так, на железнодорожном транспорте применяется пятицветная световая сигнализация с использованием красного, желтого, зеленого, синего и белого цветов.

В световой сигнализации городского транспорта используются три цвета — красный, желтый и зеленый.

На цветовом графике в системе XYZ (рис. 18) нанесены области допустимого разброса цветности световых сигналов различных цветов, представляющие собой площади, ограниченные отрезками прямых линий и участками линий спектральных цветов или только отрезками прямых линий (белый цвет). Эти области нанесены в соответствии с нормативами для цветовых сигналов в световой сигнализации на железнодорожном транспорте.

Для сигнала красного цвета допустимые отклонения являются наименьшими по сравнению с остальными сигнальными цветами. Это и понятно, так как сигнал красного цвета является сигналом, запрещающим движение.

На железнодорожном транспорте применяются красный, желтый, зеленый, синий и лунно-белый цвета. Это обеспечивает возможность при соответствующих условиях легко отличать один цветовой сигнал от другого и создает нормальные условия эксплуатации.

Мы привыкли к тому, что красный цвет означает запрещение, а зеленый разрешение проезда или прохода. На первый взгляд может показаться, что эти цвета выбраны произвольно. Однако красный цвет в качестве запрещающего сигнала выбран не случайно.

Представим себе источник белого света, расположенный на очень большом расстоянии от наблюдателя, длительное время находившегося в темноте. На этом расстоянии наблюдатель не видит источника света. По мере приближения наблюдателя к источнику света освещенность на зрачке наблюдателя будет увеличиваться. На некотором расстоянии наблюдатель впервые увидит

свет источника. Это означает, что при созданной на зрачке освещенности в глаз попадает такое количество световой энергии, при которой в глазном нерве возникают электрические импульсы, вызывающие ощущение света. Наименьшее значение освещенности на зрачке глаза наблюдателя, при которой последний видит свет, носит название пороговой освещенности, или светового порога.

Проделаем такой же опыт, как и с источником белого света, с источником, имеющим зеленый цвет. Установим сначала его на таком расстоянии, когда наблюдатель, длительное время находившийся в темноте, его не видит. Далее наблюдатель будет приближаться к источнику зеленого света. На некотором расстоянии наблюдатель впервые увидит источник зеленого света, но он будет казаться ему белым, а не зеленым. Полученная таким образом освещенность на зрачке наблюдателя характеризует световой порог для зеленого цвета. Мы говорим о световом пороге для зеленого цвета потому, что сначала видим его белым. При дальнейшем приближении источника зеленого света наблюдатель на некотором расстоянии различит его цвет. Наименьшее значение освещенности на зрачке наблюдателя, при которой последний различит не только свет, но и цвет источника света, называется цветовым порогом.

Если проделать подобный опыт для красного цвета, то окажется, что, приблизившись к источнику красного света на некоторое расстояние, мы сразу увидим его цветным. Это означает, что для красного света цветовой и световой пороги совпадают. Совпадение цветового и светового порогов имеет место только для красного света. Если бы мы взяли источники света фиолетового, синего, голубого, желтого и оранжевого цветов, то для каждого из них нашли бы световой и цветовой пороги.

На рис. 24 представлены кривые изменения световых и цветовых порогов при наблюдении монохроматических источников света в полной темноте. Из кривых видно, что разрыв между цветовым и световым порогами действительно имеет место для всех цветов, кроме красного. Наибольшее расхождение между указанными порогами наблюдается для синего и желто-зеленого цветов.

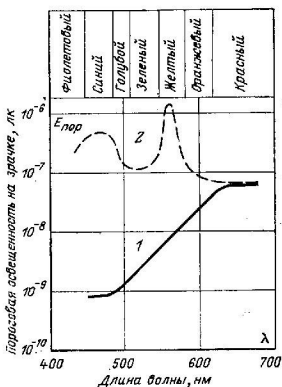


Рис. 24. Световой (1) и цветовой (2) пороги для источника света малых размеров в полной темноте.

Из сказанного ясно, что все без исключения цветные сигналы, кроме красного, при определенных условиях видения могут представляться белого цвета. Именно по этой причине они не могут применяться в качестве запрещающих движение, и запрещающим может быть только красный цвет.

Красные лучи обладают еще одним важным свойством.

Цветные световые сигналы рассматриваются нами на некотором, иногда весьма значительном, расстоянии. Между сигналом и приемником световых сигналов -- глазом -- находится атмосфера.

Известно, что атмосфера по-разному пропускает излучения различных частей видимого спектра. Коротковолновые излучения (фиолетовые, синие, голубые) ослабляются атмосферой в большей степени, чем длинноволновые (красные, оранжевые и желтые). Большее ослабление коротковолновых лучей происходит не за счет их поглощения атмосферой, а вследствие их большего рассеяния. Этим, между прочим, и обуславливается голубой цвет неба.

В том, что красные лучи рассеиваются меньше коротковолновых, легко убедиться, наблюдая заход солнца. При заходе солнца путь лучей солнца в пределах атмосферы значительно увеличивается, и поскольку коротковолновые видимые излучения рассеиваются значительно сильнее, чем длинноволновые, то цвет заходящего солнца становится красным.

Большое рассеяние коротковолновых видимых излучений по сравнению с длинноволновыми имеет место не только при хорошей видимости, но и при слабой и сильной дымке. Таким образом, и с этой точки зрения запрещающий сигнал должен быть красным, так как красные лучи меньше рассеиваются атмосферой и обеспечивают различение сигнала с большого расстояния.

В современных условиях развития транспорта, когда скорости движения резко увеличиваются, четкое различение цвета сигнала на больших расстояниях имеет весьма важное значение.

ЦВЕТНАЯ ФОТОГРАФИЯ И ЦВЕТНОЕ КИНО

Цветная фотография, как и обычная черно-белая фотография, существует более 100 лет.

Цветная фотография впервые возникла в России. В 1889 г. изобретателем Козловским был запатентован фотоаппарат для цветного фотографирования. В 1896 г. фотографом Е. Ф. Буринским был сделан доклад на съезде Русского фотографического общества о разработанном им способе цветного фотографирования. Этот способ «цветоделительного фотографирования» является основой современной цветной фотографии.

Различных способов цветного фотографирования предложено было очень много. Однако техника цветного фотографирования до последнего времени была на низком уровне, о широком ее применении не могло быть и речи. Только за последние 25—30 лет на основе развития науки и техники создана цветная фотография, ставшая достоянием широкого круга фотолюбителей.

Между техникой цветной фотографии и цветного кино нет принципиальной разницы. Возможность воспроизведения на экране объектов, цвета которых близки к цветам этих объектов в натуре, значительно обогащает фотографию и кинематографическое искусство и расширяет возможности кино.

Цветной фотографический процесс состоит из стадий цветоделения и цветовоспроизведения. Конечным результатом стадии цветоделения является негатив, а стадии цветовоспроизведения — позитив.

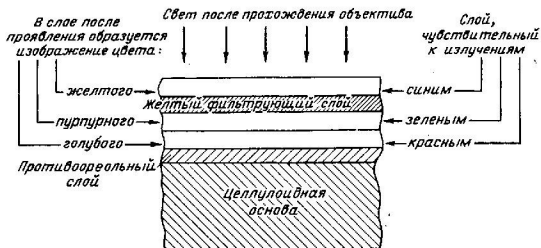


Рис. 25. Схематический разрез трехслойной светочувствительной пленки (увеличено).

Современные способы цветного воспроизведения объектов в цветной фотографии и цветном кино основаны на субтрактивном образовании цветов (см. разд. «Смещение цветов»).

В настоящее время в практике цветной фотографии и цветного кино применяется съемка на трехслойную светочувствительную пленку. Трехслойная пленка, как следует из названия, имеет три светочувствительных слоя, наложенных один на другой и нанесенных на основу из прозрачного целлюлода (рис. 25). Верхний слой чувствителен к синим, следующий к зеленым и нижний к красным излучениям. Кроме трех светочувствительных слоев в такой пленке имеется также слой, окрашенный в желтый цвет, играющий роль светофильтра. Этот слой расположен за верхним слоем, чувствительным к синим излучениям, и его назначение состоит в том, чтобы задерживать синие излучения и этим исключить их воздействие на нижние светочувствительные слои. Кроме того, между нижним светочувствительным слоем и целлюлодной основой имеется еще слой зеленого лака, осуществляющий противореолольное действие.

Фотографирование на трехслойную пленку производится с помощью обычного фотоаппарата или киноаппарата.

В каждом из трех светочувствительных слоев, кроме специальных веществ, чувствительных к одному из трех основных цветов, имеется галогенид серебра, способный чернеть под воздействием света.

Пусть имеем объект съемки в виде набора разноцветных полей (рис. VII,а). После его съемки на трехслойную пленку в результате почернения галогенида серебра в каждом из слоев будет образовано скрытое изображение, называемое цветоделенным изображением (рис. VII,б). Цветоделенных изображений будет три и степень почернения серебра в них будет определяться степенью интенсивности воздействия на них цветных составляющих светового потока, отраженных или излучаемых объектом съемки.

Цветное проявление является химическим процессом восстановления галогенида серебра в металлическое серебро. Выделяющееся в результате проявления металлическое серебро является второстепенным продуктом, который удаляется из слоев трехслойной цветной пленки после его проявления. Цветное изображение строится в каждом из трех слоев пленки из соответствующих красителей, которые образуются в результате сочетания получающихся при проявлении бесцветных продуктов окисления проявляющего вещества и бесцветных цветных компонент, вводимых специально в указанные слои пленки.

Краситель выделяется в каждом из светочувствительных слоев в местах, в которых отлагается металлическое серебро. В процессе фиксирования удаляются остатки галогенида серебра и металлического серебра изображения, и в слоях остаются изображения из соответствующих красителей. Следует указать на то, что красители закрепляются в светочувствительных слоях и не диффундируют в соседние слои, а также не вымываются из них. Таким образом в каждом из светочувствительных слоев остается только окрашенное изображение. В трехцветной негативной пленке применяют цветные компоненты, которые при цветном проявлении образуют желтый, пурпурный и голубой красители (рис. VII,в), являющиеся дополнительными к основным красному, зеленому и синему цветам, что необходимо для дальнейшего воспроизведения цвета снимаемого объекта.

Приведенный выше процесс получения цветоделенных окрашенных изображений носит наименование цветного негативного процесса, а получающаяся в результате трехслойная пленка с тремя цветоделенными окрашенными изображениями — цветным негативом. На рис. VII,г показан вид цветного негатива при рассмотрении его на экране или на просвет (при освещении белым светом).

Схема получения цветного позитивного изображения на трехслойных материалах с цветным проявлением основывается на принципах, изложенных при описании негативного процесса на цветных трехслойных пленках.

Для получения цветного позитива берется полученный цветной негатив (рис. VII,г), контактируется с трехцветной позитивной пленкой так, чтобы они были сложены эмульсионными сторонами (рис. VIII,б), и со стороны негативной пленки осуществляется освещение белым светом (рис. VIII,а). При этом в светочувствительных слоях трехцветной позитивной пленки будут образованы соответствующие скрытые цветные частичные изображения так же,

как это имело место при получении негативных цветоделенных изображений. Поскольку в слоях позитивной пленки имеются соответствующие цветные компоненты для образования красителей в местах появления металлического серебра при цветном проявлении, то в результате процесса проявления в светочувствительных слоях образуются позитивные изображения в желтом, пурпурном и голубом цветах (рис. VIII, в). На рис. VIII, г показано изображение объекта съемки при рассматривании на экране или на просвет.

Мы рассмотрели наиболее простой случай воспроизведения цвета. Однако при любых сложных комбинациях цвета почернение галогенида серебра на соответствующих участках трехслойной пленки будет соответствовать распределению и интенсивности отраженных или излучаемых объектом съемки цветных составляющих светового потока и таким образом соответствовать натуре.

Широкое применение в настоящее время имеет способ получения цветного фотографического изображения на пленках с обращением.

Пленка с обращением также имеет три светочувствительных слоя, обладающих некоторыми специальными свойствами, а также желтый фильтровый и противоореольный слои, нанесенные на основу.

В отличие от способа получения цветных фотографических изображений, при котором раздельно используется негативная пленка или фотопластинка для съемки и получения негатива и для печатания позитива, пленки с обращением предназначены для выполнения обеих указанных функций. В результате специальной обработки пленки, состоящей из нескольких процессов, происходит обращение негативного изображения в позитивное. Поэтому такие используемые пленки называют пленками с обращением, а процесс проявления — проявлением с обращением. Пленки с обращением широко используются в практике кинолюбителей для получения цветных кинофильмов и при цветном фотографировании.

Вопросы цветного фотографирования, о которых рассказано выше, не исчерпывают всех аспектов применения цвета в кино и фотографии.

Большое значение при съемке и показе цветных фильмов имеют вопросы цветопередачи, связанные с используемыми источниками света, спектральным пропусканием и отражением оптики кинопроекторов, применяемыми светофильтрами (при съемке), спектральной чувствительностью цветной пленки, а также коррекцией цвета позитива при печати фильмокопий.

ЦВЕТ НА СЦЕНЕ

Сидя в зрительном зале театра, мы подчас восхищаемся световыми и цветовыми эффектами на сцене. Источников света, которые участвуют в создании всевозможных световых эффектов, мы не видим, и поэтому не всегда представляем себе, каким образом это осуществляется.

Сценическая осветительная установка представляет собой сложный комплекс, который должен давать возможность решать самые разнообразные осветительные задачи на сцене. В самом деле, на сцене театра может представиться необходимым показать комнату с проникающим в нее солнечным светом и в вечернее время, площадь города, лесной пейзаж и многое, многое другое. Нужно иметь возможность создавать как общее освещение сцены, так и высвечивать отдельные ее места, создавая такие величины освещенности на освещаемых объектах, чтобы зрители даже из наиболее отдаленных мест зрительного зала могли бы их хорошо различать и получать художественное восприятие. Для всего этого нужны соответствующие осветительные средства.

Установка сценического постановочного освещения является системой, состоящей из целого ряда составных частей. Эти части взаимно дополняют одна другую, но способны решать и самостоятельные задачи.

Установка сценического освещения состоит из установки внутреннего освещения (осветительные приборы размещаются в пределах сцены) и установки выносного освещения (осветительные приборы размещаются за пределами сцены — в зрительном зале). Сценическое освещение осуществляется стационарной и переносной осветительной аппаратурой.

Переносная осветительная аппаратура, как показывает само название, может служить для различных целей освещения и использоваться в различных частях сцены.

Стационарная осветительная аппаратура устанавливается на специальных конструкциях на сцене или вне ее в зрительном зале. Некоторые из этих конструкций являются подвижными, другие же не имеют возможности перемещения. Установленная мощность стационарной осветительной аппаратуры неизменна.

Стационарная осветительная аппаратура установки внутреннего освещения сцены состоит из аппаратуры верхнего и бокового освещения.

Стационарная осветительная аппаратура установки верхнего внутреннего освещения размещается на так называемых софитных фермах, представляющих собой металлоконструкции, на которых размещаются осветительные приборы. Софитные фермы вместе с осветительной аппаратурой носят название софитов. Софиты с помощью специальных механизмов могут перемещаться вверх и вниз. Таким образом, возможно обслуживание осветительной аппаратуры с планшета¹ сцены. Софиты равномерно размещены по сцене (рис. 26), причем расстояние между соседними софитами составляет 2—2,5 м. Они имеют большую протяженность, зависящую от ширины сцены. На софитах устанавливаются камерные светильники, в каждой камере которых размещается зеркальная осветительная лампа накаливания (или не зеркализованная) мощностью 200, 300 или 500 Вт в зависимости от размера сцены. Та-

¹ Планшетом называется пол сцены.

ким образом, зеркальные лампы равномерно размещены по сцене и как бы осуществляют общее освещение сцены. На софитах могут также размещаться прожекторы различных типов и мощностей (в том числе и прожекторы с дистанционным поворотом в вертикальной и горизонтальной плоскостях) и проекционная аппаратура для создания проекционных декораций и различных световых эффектов (дождь, снег, облака и др.). Аппаратура бокового внутреннего освещения сцены осуществляется прожекторами различной мощности, устанавливаемыми на специальных металлоконструкциях, расположенных у зеркала сцены¹ и называемых порталными кулисами (рис. 26). Кроме того, к стационарной аппаратуре бокового освещения относятся прожекторы различных мощностей, устанавливаемые на барьере так называемой осветительской рабочей галереи (балкон), расположенной вдоль боковых и задней сторон сцены на высоте 6—10 м от планшета сцены.

Стационарная осветительная аппаратура установки выносного освещения размещается в зрительном зале и состоит из аппаратуры верхнего, нижнего, бокового и фронтального освещения. На рис. 26 показано размещение осветительной аппаратуры всех видов выносного освещения.

Аппаратура верхнего выносного освещения (прожекторы) размещается в специальном техническом помещении над потолком зрительного зала (светят через щель в потолке). Аппаратура нижнего выносного освещения представляет собой совокупность камерных светильников, основания которых располагаются несколько ниже уровня планшета, и называется рампой. Аппаратура бокового выносного освещения (прожекторы) располагается в специальных технических помещениях за боковыми стенами зрительного зала (светят через проемы) или в так называемых осветительских ложах на боковых стенах зрительного зала. Фронтальное выносное освещение осуществляется из специального технического помещения (светопроекционная), которое размещается за зрительным залом. Осветительными приборами для фронтального выносного освещения являются мощные прожекторы. В этом же техническом помещении размещается мощная проекционная аппаратура. Проекция на просвет осуществляется через просвечивающие экраны на сцене с помощью мощных диапроекторов из помещения рирпроекционной. Каждая из перечисленных выше частей осветительной сценической установки выполняет определенные функции.

Установленная мощность осветительной установки большой силы достигает 600—1300 кВт, причем значительная доля этой мощности приходится на верхнее освещение, осуществляемое в основном зеркальными осветительными лампами, и на переносное освещение.

Исходя из изложенного, можно видеть, что сценическая осветительная установка является сложной системой, состоящей из боль-

¹ Зеркалом сцены называется отверстие в передней стене сцены, через которое зрители наблюдают спектакль.

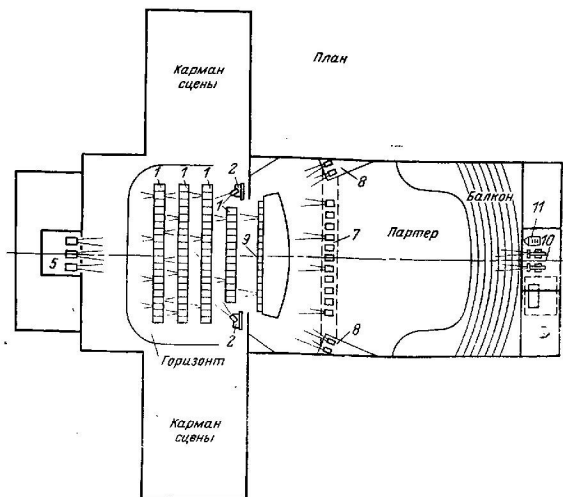
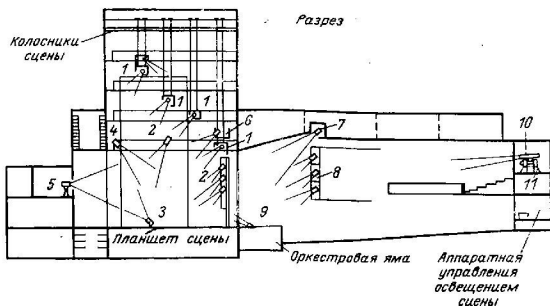


Рис. 26. Размещение сценической осветительной аппаратуры.

1 — осветительная аппаратура верхнего внутреннего освещения (на софитах); 2 — осветительная аппаратура внутреннего бокового освещения; 3 — переносная осветительная аппаратура; 4 — осветительная аппаратура контражурного освещения; 5 — светопроекционная аппаратура для рирпроекции; 6 — осветительная и светопроекционная аппаратура на стационарном мосту; 7 — осветительные приборы верхнего выносного освещения; 8 — осветительная аппаратура бокового выносного освещения; 9 — осветительная аппаратура нижнего выносного освещения; 10 — осветительные приборы фронтального выносного освещения; 11 — светопроекционная аппаратура для фронтпроекции.

шого количества разнообразной осветительной аппаратуры. Основной сценического театрального освещения является смешение цветов. Цветные световые потоки создаются на сцене указанной выше осветительной аппаратурой (в совокупности с цветными светофильтрами, устанавливаемыми перед выходными отверстиями осветительных приборов). Осветительные приборы верхнего внутреннего освещения, а также нижнего и верхнего выносного освещения делятся, как правило, на четыре цвета: красный, синий, желтый и белый. Следует указать на то, что специальная часть верхней осветительной аппаратуры на сцене, служащая для освещения перспективы неба (горизонта), делится на иные, чем указанные выше, цвета, преимущественно холодные.

Для выносной и другой осветительной аппаратуры, являющейся эксплуатационно труднодоступной, широко применяются специальные устройства, дающие возможность дистанционно менять светофильтры, имеющиеся в комплекте этой аппаратуры.

Для того чтобы иметь возможность создавать различные условия освещения, а также создавать на сцене плавные переходы от светлого времени к сумеркам и наоборот, используются специальные регуляторы сценического освещения¹. Многие из осветительных приборов различных частей осветительной установки включаются в цепь этих регуляторов. Это дает возможность плавно изменять световой поток источников света от нуля до номинального значения и наоборот. Изменяя световые потоки групп зеркальных ламп, прожекторов и других осветительных приборов разных цветов, можно изменять соотношения смешиваемых цветов, а следовательно, и цвет смеси и цветность освещаемых объектов на сцене. Таким образом, сценическая осветительная установка дает возможность изменять в широких пределах как величины освещенности объектов на сцене, так и их цветность.

Преимущественное применение в настоящее время для стационарного освещения сцены ламп накаливания объясняется стабильностью их световых характеристик, возможностью значительно концентрировать их световой поток, возможностью надежно и качественно осуществлять плавное и глубокое регулирование их светового потока, а также простотой их эксплуатации.

Однако лампы накаливания имеют и ряд недостатков в отношении их применения для общего сценического освещения. Световая отдача зеркальных осветительных ламп, применяемых для верхнего освещения сцены, составляет примерно 15 лм/Вт. Коэффициенты пропускания применяемых стеклянных светофильтров красного, синего, желтого и зеленого цветов при толщине 2 мм составляют соответственно примерно 16, 22, 87 и 18%. Световая отдача комбинации зеркальная лампа — светофильтр для светофильтров различных цветов составит примерно 2,4 для красного цвета, 3,3 для

¹ Регуляторы сценического освещения могут быть основаны на различных принципах, имеются электрические регуляторы с применением автотрансформаторов, а также электронные регуляторы с использованием тириستоров.

сильного, 13 для желтого и 2,7 лм/Вт для зеленого цвета. Таким образом, большая часть светового потока источников света поглощается светофильтрами и не используется для целей освещения.

Некоторые трудности в процессе эксплуатации сценической осветительной установки с лампами накаливания создает и то обстоятельство, что при изменении напряжения на лампах накаливания изменяется не только световой поток, излучаемый ими, но и цветность их излучения, поскольку спектральный состав излучения нити накала изменяется в значительной степени.

Указанные недостатки ламп накаливания в их применении для общего сценического освещения явились причиной поисков других источников света, которым бы не были присущи эти недостатки.

Таковыми источниками света явились люминесцентные лампы сетевого напряжения. Люминесцентные лампы имеют то преимущество перед лампами накаливания в части создания цветного освещения, что не обязательно требуют применения цветных светофильтров для получения цветных световых потоков, так как могут быть цветными (всех необходимых цветов). Световая отдача белой люминесцентной лампы быстрого зажигания типа ЛБ40БП мощностью 40 Вт составляет 59 лм/Вт.

Световая отдача красных и синих люминесцентных ламп хоть и ниже, чем у ламп ЛБ40БЛ, но, безусловно, значительно выше, чем у комбинации зеркальной осветительной лампы с красным или синим светофильтром.

Применение люминесцентных ламп в сценическом постановочном освещении целесообразно лишь при наличии качественного регулирования их светового потока в широких пределах, а также наличия быстрого зажигания (бесстартерное зажигание) и получения нужной концентрации их светового потока.

Зажигание и работа больших групп люминесцентных ламп при питании от тиристорных регуляторов осуществляются устойчиво при любом режиме их работы, от минимального до номинального. Глубина регулирования светового потока составляет при этом 1:10 000. Это означает, что лампа при минимальном режиме горения излучает световой поток в 10 000 раз меньший, чем при номинальном режиме горения.

Люминесцентные лампы применяются в настоящее время на сцене для освещения горизонта. Практика показала, что освещение горизонта с помощью цветных люминесцентных ламп или белых люминесцентных ламп в совокупности с цветными пленочными светофильтрами получается очень качественным и эффективным. Немаловажную роль играет и то обстоятельство, что использование этих ламп для освещения горизонта приводит к значительному уменьшению мощности и соответственно дает экономию электроэнергии.

Следует указать на то, что срок службы люминесцентных ламп типа ЛБ40БП мощностью 40 Вт составляет номинально 7 500 ч, что значительно превосходит срок службы зеркальных осветительных ламп, составляющий 1 000 ч. Следует сказать и о большом

эксплуатационном преимуществе люминесцентных ламп для сценического освещения, заключающемся в том, что при изменении светового потока цветность их излучения остается практически неизменной. Важным является и то обстоятельство, что температура поверхности колбы люминесцентной лампы составляет 40—50°C, что является важным с точки зрения пожарной безопасности.

Весьма эффективно применяются в сценическом освещении шаровые газоразрядные ксеноновые лампы сверхвысокого давления и трубчатые газоразрядные ксеноновые лампы высокого давления. Они представляют собой газоразрядные лампы, разряд в которых происходит в газе ксене. Эти лампы характерны тем, что спектр их излучения является непрерывным и по цветности очень близок к цветности прямых солнечных лучей, следовательно, они обладают очень хорошей цветопередачей. Таким образом, цвет поверхностей и объектов, освещаемых светом ксеноновых ламп, воспринимается нами так, как будто они освещены солнечным светом. Ксеноновые лампы обладают достаточно высокой световой отдачей, составляющей 25—35 лм/Вт. Они могут быть выполнены как с воздушным, так и с водяным охлаждением. Шаровые ксеноновые лампы выпускаются мощностью 0,2; 0,5; 1; 2 и 3 кВт и более, а трубчатые 2, 3, 5, 8 кВт и более. Ксеноновые лампы обладают рядом свойств, весьма важных для применения их на сцене. Световой поток ксеноновых ламп возможно изменять в широких пределах, при этом цветность их светового потока, так же как и люминесцентных ламп, остается практически неизменной. Повторное включение ксеноновых ламп возможно сразу же после их отключения, и это выгодно отличает эти лампы от ртутных ламп высокого давления, которые требуют некоторого времени на охлаждение для возможности повторного зажигания. Наличие у шаровых ксеноновых ламп светящего тела небольших габаритов дает возможность весьма эффективно применять их в прожекторах и проекционной аппаратуре.

Недостатком шаровых ксеноновых ламп является невозможность располагать их в любом нужном положении. Эти лампы работают в вертикальном положении и допускают отклонение от вертикали всего на угол 15°. Это связано с тепловым режимом их работы.

Уже начали находить применение для эффектного освещения на сцене импульсные ксеноновые лампы.

Немаловажную роль в сценических осветительных установках играет световая проекция. Статическая цветная световая проекция в ряде случаев с успехом заменяет дорогостоящие написанные красками декорации, динамическая же цветная и черно-белая проекции дают постановщикам большие художественные возможности. В театральных проекционных аппаратах в качестве источников света используются как лампы накаливания, так и ксеноновые газоразрядные лампы.

Следует также указать на весьма эффективное применение светящихся веществ на театральной сцене. В ряде наших театров,

в цирках и на эстраде светящиеся вещества уже используются довольно широко.

Светящиеся вещества могут применяться в виде органических красителей или в виде так называемых кристаллофосфоров. Растворенными органическими красителями возможно пропитывать ткани и получать при облучении различные цвета их свечения. Кристаллофосфоры нерастворимы, но из них можно готовить светящиеся краски и пользоваться ими как обычными красками. Светящиеся краски можно смешивать между собой, а также с обычными красителями. Светящиеся краски могут быть практически всех возможных цветов (учитывая возможность смесей) при облучении их ближним ультрафиолетовым излучением.

Источниками ближнего ультрафиолета чаще всего служат ртутные лампы высокого или сверхвысокого давления. Видимое излучение ртутных ламп поглощается специальными светофильтрами (черное увиолевое стекло), пропускающими ближнее ультрафиолетовое излучение, возбуждающее светящиеся вещества.

Трубчатые ртутные лампы высокого давления (типа ДРТ), установленные в корытообразных светильниках, перекрытых плоским черным стеклом, служат для общего облучения светящихся веществ, нанесенных на декорации или костюмы. Для локального облучения светящихся веществ на больших расстояниях используют шаровые ртутные лампы сверхвысокого давления. Помещая такую лампу в прожектор, в выходном отверстии которого установлено черное увиолевое стекло, получают концентрированный поток ближнего ультрафиолетового излучения.

В область сценического освещения проник уже и луч лазера. Первые опыты по использованию красного, зеленого и синего лучей лазера, действующих совокупно и раздельно, обнаружили целый ряд интересных явлений, связанных с получением эффектов объемности, динамичности, многоцветности и меняющейся интенсивности.

ЦВЕТ В ПОЛИГРАФИИ

Получение многоцветных изображений в виде цветных иллюстраций к книгам, репродукций с картин, плакатов, географических карт и т. д. основано на явлениях оптического смешения трех основных цветов — красного, зеленого и синего, а также на возможности изготовления многоцветных изображений путем смешения трех красок или наложения один на другой трех прозрачных цветных слоев.

Здесь, так же как и в цветной фотографии, с многоцветного изображения получают три цветоделенных негатива путем фотографирования этого изображения через красный, зеленый и синий светофильтры.

Из предыдущего изложения мы уже знаем, как под действием различных цветных лучей происходит формирование красного, зеленого и синего цветоделенных негативов.

С каждого из цветоделенных негативов изготавливают металлическую копию, нужную для печати и называемую клише. Таким образом изготавливают три клише.

Красный цветоделенный негатив прозрачен в местах, соответствующих синему, голубому и зеленому цветам на оригинале. Зеленый цветоделенный негатив прозрачен в местах, соответствующих красному и пурпурному цветам оригинала, а синий цветоделенный негатив прозрачен в местах, соответствующих зеленому, желтому и красному цветам оригинала.

Цветная печать с помощью трех красок называется трехцветной печатью. В трехцветной полиграфии используются голубая, пурпурная и желтая краски.

Поскольку красный цветоделенный негатив прозрачен в местах, соответствующих синему, голубому и зеленому цветам, то, следовательно, клише, изготовленное с этого негатива, должно быть предназначено для голубой краски. Рассуждая таким образом, найдем, что клише, изготовленное с зеленого цветоделенного негатива, должно быть предназначено для пурпурной краски, а с синего цветоделенного негатива — для желтой краски. Окрашенными в один из указанных цветов на клише являются поверхности, которые на негативе в большей или меньшей степени прозрачны.

Обязательным условием получения правильного цветного изображения является пропорциональность интенсивности оттиска с клише прозрачности негатива. Там, где негатив более прозрачен, цветной оттиск должен быть более интенсивен, а там, где менее прозрачен, — менее интенсивен.

Для получения многоцветного изображения, соответствующего оригиналу, надо с трех клише сделать оттиск на белой бумаге, наложив их один на другой.

Каждый цвет оригинала будет образован тремя прозрачными цветными слоями: голубым, пурпурным и желтым, интенсивность которых различна. Нетрудно заметить, что голубой, пурпурный и желтый цвета являются дополнительными к красному, зеленому и синему.

Таким образом, цветная печать с помощью трех красок основывается на субтрактивном образовании цветов.

Посмотрим для примера, как воспроизводится какой-либо цвет оригинала, например зеленый.

Красный цветоделенный негатив в месте, соответствующем зеленому цвету на оригинале, прозрачен. Зеленый цветоделенный негатив в месте, соответствующем зеленому цвету, непрозрачен. Синий цветоделенный негатив в месте, соответствующем зеленому цвету на оригинале, прозрачен.

Оттиски, полученные с трех клише в том месте, где на оригинале был зеленый цвет, дадут наложение одной на другую голубой и желтой красок. Пусть внизу находится желтая, а сверху голубая краска.

Полученное цветное изображение освещается белым светом. После прохождения верхнего голубого слоя в составе светового

потока будут синие и зеленые лучи (синий+зеленый=голубой). При прохождении через нижний слой желтой краски будут поглощены синие лучи и от белой подложки будут отражены зеленые лучи, которые пройдут оба слоя желтой и голубой краски. Таким образом, это место на цветном изображении будет зеленым.

Подобные явления будут происходить и на других участках цветного изображения, и мы получим цветную копию оригинала. В качестве хроматических красок могут быть использованы различные красители. Примером применяемых красителей являются пигмент голубой фталоциановый, лак основной розовый и пигмент желтый светопрозрачный.

Эти краски при наложении одной на другую дают чистые зеленые, фиолетовые и оранжевые цвета. Вследствие малого поглощения они не дают черного цвета. Поэтому при трехцветной печати в некоторых случаях добавляют серую или черную краску.

Для того чтобы иметь представление о том, какие цвета могут быть получены с помощью основных красок, пользуются шкалами цветового охвата. Для применяемых в цветной печати красок имеются заранее изготовленные шкалы цветового охвата. По ним судят, может ли быть воспроизведен имеющимися красками цвет оригинала.

Шкалы цветового охвата изготавливаются печатным путем и получаются наложением выбранных исходных красок с постепенным изменением их чистоты цвета. Они состоят из ряда больших квадратов, каждый из которых состоит из маленьких квадратов по числу градаций по чистоте исходных цветов. На рис. IX показан один из больших квадратов шкалы цветового охвата, состоящий из 36 малых квадратов. В качестве исходных для этого большого квадрата взяты пурпурный и голубой цвета, имеющие шесть градаций по чистоте цвета каждый. На смесь этих двух цветов (пурпурного) и (голубого) наложен желтый цвет, показанный сверху.

Для построения шкалы цветового охвата существует определенная система.

ЦВЕТНОЕ ТЕЛЕВИДЕНИЕ

Телевидение, т. е. видение изображений, передаваемых с помощью электрических средств на большие расстояния, является одним из величайших достижений современной техники.

Однако черно-белое телевидение, которое нашло себе всеобщее признание, не является пределом развития телевизионной техники. Сейчас все более широкое развитие получает цветное телевидение, в котором изображение передается и принимается цветным.

Цветное телевидение имеет большое познавательное значение и приобретает большую выразительность, поскольку изображение передается и принимается в натуральных цветах. Целый ряд передач, связанных с показом различных торжеств, спортивных празднеств, путешествий и др., являются значительно более интересными и увлекательными при показе их в цвете.

Важным преимуществом цветного телевидения является значительно большая четкость и контрастность изображения. Так, на черно-белом экране два объекта, имеющих одинаковую яркость, но разные цвета, будут восприняты одинаковыми, а на цветном экране — разными. Кроме того, наличие в изображении различного цвета деталей и предметов, соответствующих натуре, создает в определенной степени впечатление объемности.

В цветном телевидении используется аддитивное сложение цветов.

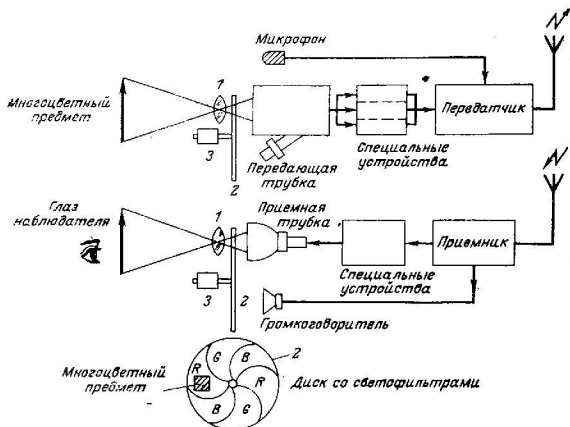


Рис. 27. Упрощенная структурная схема цветной телевизионной системы с последовательной передачей цветов.

Цветное телевидение в своем развитии проходило через ряд различных систем, имеющих принципиальные различия. Первой и наиболее простой системой цветного телевидения является система с последовательной передачей цветов. Эта система, как и другие, основывается на явлении сложения цветов и возможности получения любого цвета путем сложения трех цветов: красного, зеленого и синего. Значительно более сложной с точки зрения технического осуществления является трехцветная система с одновременной передачей цветов.

Система с последовательной передачей цветов имеет целый ряд недостатков и поэтому нигде к широкому внедрению не принята, но может быть использована в системах промышленного телевидения, т. е. для телевизионных передач внутри промышленного предприятия. Однако, являясь наиболее простой в осуществ-

влении, эта система многое дала в части накопления опыта цветных телевизионных передач.

Познакомимся вкратце с этой системой передачи цветов. В системе с последовательной передачей цветов изображение передаваемого объекта разлагается на цветовые составляющие с помощью трех вращающихся светофильтров — красного, зеленого и синего. В системе же с одновременной передачей цветов цветное изображение также разлагается на цветовые составляющие, однако это осуществляется по совершенно иному принципу.

На рис. 27 представлена упрощенная структурная схема цветной телевизионной системы с последовательной передачей цветов.

Многоцветный предмет через линзу L проектируется на передающую трубку. Между цветным предметом и передающей трубкой установлен диск 2, на котором укреплены три цветных светофильтра — красный (R), зеленый (G) и синий (B). Диск приводится во вращение от синхронного электродвигателя 3. Таким образом, цветной предмет последовательно проектируется на приемную трубку передатчика сначала в красном, затем в зеленом и синем цвете. Возникающие при этом в передатчике электрические сигналы принимаются и усиливаются приемником, и изображения, полученные на приемной трубке приемника, рассматриваются наблюдателем через линзу.

Так же как и в передающем устройстве, между приемной трубкой и линзой установлен диск с тремя светофильтрами — красным, зеленым и синим, подобными установленным в передающем устройстве. Диск приемника вращается синхронно с диском передатчика, и последовательность прохождения цветов у них одинаковая.

Если диски вращаются с небольшой скоростью, то наблюдатель видит изображение цветного предмета последовательно в красном, зеленом и синем цветах.

При скорости диска, при которой полный оборот будет совершаться меньше, чем в 0,1 с, наблюдатель увидит передаваемый предмет в натуральных цветах. Это происходит потому, что наш глаз обладает свойством сохранять на некоторое небольшое время образ видимого, и при такой частоте вращения дисков изображения предмета в красном, зеленом и синем цветах накладываются в сетчатке глаза одно на другое и, таким образом, создают изображение передаваемого предмета в натуральных цветах.

Необходимым условием при передаче цветных изображений являются синхронизация вращения цветных дисков между собой и с разверткой на передатчике и приемнике, а также получение за время нахождения в поле светофильтра одного цвета одной или более полных разверток.

На рис. 28 представлена упрощенная структурная схема цветной телевизионной системы с одновременной передачей цветов.

Многоцветный предмет P , через объектив O_1 проектируется на систему двух цветоизбирательных зеркал I_1 и I_2 интерференционного типа. Интерференционные зеркала обладают тем свойством, что пропускают световой поток одного цвета и отражают световой

поток другого цвета. Эти зеркала предназначены для разделения светового потока, падающего от многоцветного предмета на объектив, на основные цвета: красный, зеленый и синий. Каждое из трех разделенных одноцветных изображений попадает на соответствующий фотокатод одной из трех имеющихся в передатчике телевизионных трубок. Таким образом, на фотокатode трубки R мы имеем изображение цветного предмета в красном цвете, а на двух других в зеленом и синем цветах.

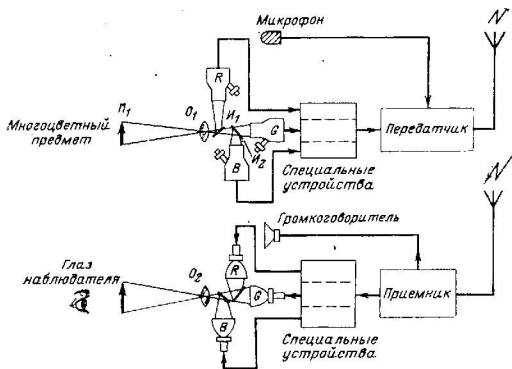


Рис. 28. Упрощенная структурная схема цветной телевизионной системы с одновременной передачей цветов.

На фотокатодах происходит преобразование одноцветных оптических изображений передаваемого предмета в видеосигналы¹. Электромагнитные колебания, промодулированные этими видеосигналами, посылаются одновременно передатчиком в пространство.

Принятые приемником электромагнитные колебания разделяются в нем на три видеосигнала R , G и B , усиливаются и поступают на три приемные телевизионные трубки, на экранах которых воспроизводится изображение передаваемого предмета в основных цветах R , G и B .

С помощью системы интерференционных зеркал, подобных тем, что мы имеем в передающей установке, и объектива O_2 три изображения в основных цветах R , G и B совмещаются в одно суммарное изображение, которое соответствует по цвету многоцветному изображению передаваемого объекта.

¹ Видеосигналом называется электрический сигнал, пропорциональный яркости данной точки передаваемого изображения.

ных цветных телевизионных приемников, то для их упрощения, удешевления и облегчения эксплуатации три кинескопа для цветов R , G и B заменены одним трехцветным кинескопом, устройство которого показано на рис. 29.

Экран кинескопа выполняется в виде мозаики, состоящей из сотен тысяч люминофорных групп, каждая из которых представляет сочетание трех точек красного R , зеленого G и синего B люминофоров (рис. 29,б). Люминофорные точки R , G и B последовательно повторяются по направлению вдоль строки.

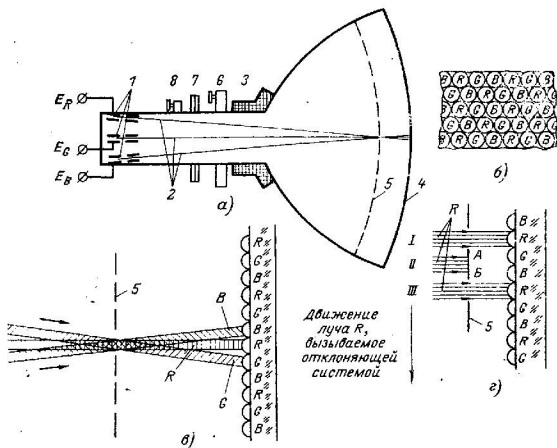


Рис. 29. Устройство и работа трехцветного кинескопа.

a — эскиз трубки; b — устройство мозаичного экрана; c — прохождение электронных лучей R , G и B через отверстия маски; d — работа маски; I — электронные прожекторы R , G и B ; 2 — электронные лучи R , G и B ; 3 — отклоняющая система, общая для электронных лучей R , G и B ; 4 — мозаичный экран; 5 — маска; 6 — электромагниты, обеспечивающие сходимость лучей; 7 — магниты чистоты цвета; 8 — магнит перемещения синего электронного луча B .

В соответствии с наличием трехцветного мозаичного экрана кинескоп содержит три отдельных электронных прожектора, которые создают три электронных луча R , G и B (рис. 29,а), воздействующих на люминофорные точки R , G и B .

Интенсивность каждого из электронных лучей регулируется в соответствии с изменением напряжения E_R , E_G и E_B на управляющих электродах.

При изменении интенсивности лучей электронных прожекторов будет изменяться яркость R , G и B люминофоров и их суммарный цвет.

Поскольку перемещение связанных электронных лучей в пространстве происходит с колоссальной скоростью, то эти связанные лучи будут обогать все множество люминофорных групп и создавать цветное изображение объекта передачи в натуральных цветах.

Для того чтобы каждый из электронных лучей, достигая мозаичного экрана, попадал только на точки люминофора «своего цвета», перед экраном устанавливается металлическая пластинка толщиной 0,15 мм с количеством отверстий, соответствующим количеству люминофорных групп для прохождения электронных лучей, называемая маской. Таким образом, при наличии кадровой и строчной разверток электронные лучи будут последовательно проникать через отверстия маски и одновременно возбуждать три точечных люминофора R , G и B , расположенных непосредственно за каждым отверстием маски.

Если бы маска отсутствовала, то каждый из электронных лучей, двигаясь по строкам и кадрам, возбуждал бы кроме точек люминофора соответствующего ему цвета (например R) также точки люминофоров других цветов (G и B). На рис. 29,2 показано защитное действие маски. Здесь для наглядности взят только один электронный луч R , который проходит последовательно положения I , II и III . Когда электронный луч сходится с точки R_1 , участок маски AB закрывает точки G и B от попадания на них этого луча. То же самое происходит с электронными лучами G и B , и таким образом обеспечивается попадание их при прохождении маски только на соответствующие катодлюминофоры.

Для правильной работы трехцветного кинескопа с маской необходимо, чтобы три электронных луча R , G и B одновременно проходили через каждую точку маски на всей ее поверхности.

В настоящее время в отечественных серийно выпускаемых масках цветных телевизорах используются кинескопы с маской.

ЦВЕТ В ОСВЕЩЕНИИ И СВЕТОВОМ ОФОРМЛЕНИИ ГОРОДА

Вечером в городах зажигаются огромное количество осветительных приборов для освещения улиц и площадей, фасадов зданий и сооружений, памятников и фонтанов, всевозможные светящиеся знаки, указатели и др. Освещение города вечером имеет как утилитарное значение, обеспечивая видимость для пешеходов и транспорта, так и художественно-эстетическое.

Большое значение в вечернем световом оформлении города имеет цвет, который является неотъемлемой частью световой рекламы, освещения витрин и светящихся фонтанов, находит отражение при решении вопросов освещения фасадов зданий, зелени в парках и скверах и др.

Освещение и световое оформление города состоят из совокупности целого ряда элементов, взаимно связанных между собой. Исходя из этого при решении освещения и светового оформления города в его основу должно быть положено единое комплексное композиционное решение, которое объединяло бы все элементы

освещения. Такое единое композиционное решение может быть правильно найдено при совместной работе архитекторов, художников и светотехников.

Освещение улиц и площадей. Основной задачей системы уличного освещения является создание благоприятных и безопасных условий для движения пешеходов и транспорта. Нормами регламентируется средняя яркость сухих покрытий проезжей части улиц, равномерность распределения яркости, а также освещенность тротуаров.

Для уличного освещения должны применяться источники света, обладающие достаточно хорошей цветопередачей с тем, чтобы цвет лица людей не претерпевал недопустимых искажений.

Для создания нужных условий освещения улиц и площадей применяются специальные светильники для наружного освещения с лампами накаливания, люминесцентными лампами и ртутными лампами с исправленной цветностью типа ДРЛ (дуговая ртутная люминесцентная). Эта лампа представляет собой стеклянный баллон эллипсоидной формы, внутри которого находится кварцевая горелка трубчатой формы. Горелка наполнена дозированным количеством ртути и аргона, и в ней происходит разряд в ртути. Как известно, в спектре ртутной лампы высокого давления имеются в основном излучения желтого, зеленого, синего и фиолетового цветов, а также невидимое ультрафиолетовое излучение. Ультрафиолетовое излучение поглощается соответствующим люминофором, нанесенным на внутреннюю поверхность баллона эллипсоидной формы, и преобразуется в видимое излучение оранжево-красного цвета, в определенной степени исправляющее цветность излучения ртутной лампы. Лампы типа ДРЛ выпускаются различной мощности.

Для наружного освещения применяются также металлогалогенные лампы типа ДРИ (дуговая ртутная с добавкой йодидов металлов), обладающие большой эффективностью и лучшей, чем лампы ДРЛ, цветопередачей.

Для освещения больших площадей используются трубчатые ксеноновые лампы высокого давления большой мощности, обладающие очень хорошей цветопередачей. Так, для освещения Комсомольской площади в Москве применены четыре прожектора с ксеноновыми газоразрядными лампами мощностью 20 кВт каждая, установленные попарно на высоких опорах.

На улицах с большим количеством магазинов освещенность тротуаров несколько повышается за счет освещенных витрин и света, проникающего через окна магазинов.

Освещение зданий и сооружений. В практике освещения отдельных зданий и сооружений, а также ансамблей в вечернее время используются: освещение всей их видимой поверхности, освещение их отдельных элементов (шиль, портик, колоннада и др.), световое обрамление их основных линий. Для освещения больших видимых поверхностей зданий и сооружений используют прожекторы заливающего света, фасадные прожекторы и др.,

размещаемые на близлежащих зданиях, на опорах установок уличного освещения, а также на земле на конструкциях или в траншеях перед зданием или сооружением.

В указанных прожекторах используются лампы накаливания, ртутные лампы с исправленной цветностью и лампы с йодидами металлов, а также натриевые газоразрядные лампы, имеющие золотисто-желтый цвет. В отдельных случаях применяют прожекторы с ксеноновыми газоразрядными лампами.

При проектировании освещения здания или сооружения, имеющего ту или иную окраску, необходимо учитывать характер излучения применяемых для этого источников света, и в необходимых случаях в прожекторах применять светофильтры требуемых цветов.

Световая реклама. Вечером с наступлением сумерек на улицах и площадях городов зажигаются тысячи разноцветных огней. Это всевозможные светящиеся рекламные надписи и панно, вывески, рисунки и фигуры, размещенные на крышах зданий на их фасадах, а также на специальных конструкциях.

Подчас световая реклама представляет собой неподвижные светящиеся надписи, рисунки или фигуры, и тогда она называется статической. Однако наиболее эффектной является динамическая светящаяся реклама, когда отдельные ее элементы периодически зажигаются и тушатся, бегут или мигают, а подчас меняют свою конфигурацию.

Особенно красивой динамическая светящаяся реклама становится в случае гармонического подбора цветов источников света.

Для световой рекламы очень широко применяются люминесцентные лампы высокого напряжения (высоковольтные газосветные трубки), а также применяются лампы накаливания как в прозрачных, так и в окрашенных в различные цвета колбах.

Высоковольтные люминесцентные лампы представляют собой трубки из прозрачного стекла диаметром от 10 до 16 мм. На концах трубок впаяны электроды с выводами для подведения питающего напряжения.

Цветность люминесцентных ламп высокого напряжения зависит от наполняющего их газа.

При наполнении неоном лампа дает излучение красного цвета, а при наполнении аргоном — синего цвета. Однако наличие только двух цветов этих ламп в значительной степени ограничивало возможности цветной световой рекламы, делало ее монотонной и однообразной.

В связи с этим, кроме наполнения неоном и аргоном, в лампы начали вводить в дополнение к этим газам дозированное количество ртути. В этом случае в лампе происходит свечение паров ртути, а неон или аргон играют вспомогательную роль, облегчая зажигание лампы. Высоковольтные люминесцентные лампы, дозированные ртутью, дают возможность значительно расширить количество цветов этих ламп, с одной стороны, а с другой стороны, увеличить их экономичность. Для этого на внутреннюю поверх-

ность трубки наносится слой люминофора. Таким образом, ближнее ультрафиолетовое излучение, которое излучает ртутный разряд, поглощается люминофором и трансформируется им в видимое излучение. Люминофоры могут иметь различный состав и давать излучение различного цвета. Цветность излучения лампы получается из совокупности излучения люминофора и видимого излучения разряда лампы.

Что касается вопроса экономичности, то в неоновых и аргоновых высоковольтных лампах в световое излучение преобразуется 3—6% подводимой электрической энергии, а в этих же лампах, дозированных ртутью и снабженных люминофором, 8—12%.

Люминесцентные лампы высокого напряжения питаются от специальных трансформаторов. Потребное напряжение — около 1 000 В на погонный метр трубки.

Поскольку трубки имеют небольшой диаметр, то их можно изгибать и придавать им нужную форму. Максимальная длина одной трубки может быть около 12 м.

В настоящее время люминесцентные высоковольтные лампы изготавливаются 20—25 цветов.

В табл. 3 приведены данные, касающиеся цвета некоторых люминесцентных ламп высокого напряжения в зависимости от применяемых люминофоров и газового наполнения.

Таблица 3

Цвет свечения люминесцентных ламп высокого напряжения в зависимости от наполнения и люминофора

Цвет свечения	Наполнение	Люминофор
Оранжево-красный	Ne	—
Розовый	Ne	Вольфрамат кальция
Темно-зеленый	Ne+Ag	Силикат цинка
Светло-зеленый	Ag+Hg	Силикат цинка
Голубой	Ag+Hg	Вольфрамат магния
Темно-синий	Ag+Hg	Вольфрамат кальция
Белый	Ag+Hg	Цинк—бериллий—силикат

При подведении номинального напряжения люминесцентные лампы высокого напряжения зажигаются практически мгновенно и при очень низких температурах, но наилучшие условия для их работы имеют место при температурах $+25 \div -50^\circ\text{C}$. Это обстоятельство очень важно, так как дает возможность осуществлять динамическую световую рекламу в любое время года без применения каких-либо дополнительных устройств. Срок службы этих ламп составляет примерно 1 000 ч.

В настоящее время на улицах и площадях городов с помощью таких люминесцентных ламп создаются целые ансамбли рекламного освещения.

Освещение фонтанов и зелени. Очень эффектное зрелище представляют собой освещенные фонтаны, расположенные на площадях города, в парках и скверах.

Эффект освещения фонтанов значительно усиливается при цветном динамическом освещении водяных струй. Количество цветов может быть различным в зависимости от количества бассейнов фонтана, принятой системы и программы освещения. Переход от одного цвета к другому осуществляется автоматически.

Освещение водяных струй и водяной пыли, образующейся над фонтаном, может осуществляться прожекторами заливающего света, располагаемыми снаружи.

При цветном динамическом освещении фонтанов осветительные приборы, как правило, размещаются в самом бассейне и отдельных его элементах невидимо для наблюдателей. Освещение осуществляется в направлении поднимающихся или опадающих струй воды. Осветительные приборы могут размещаться в бассейне по-разному. В некоторых больших фонтанах применяется групповое расположение осветительных приборов или зеркальных ламп со светофильтрами и без них, размещаемых в специальных герметизированных поясах, траншеях и нишах.

Наиболее рациональным является применение для освещения фонтанов герметических осветительных приборов, размещаемых в бассейне группами или рассредоточенно в соответствии с размещением сопел для выбрасывания водяных струй. Выходные отверстия осветительных приборов перекрываются нужными цветными светофильтрами.

Следует отметить, что в цветных фонтанах, работающих с заданной цветной программой, используются или непосредственно цвета, которые выбраны для осветительных приборов, или их смеси, дающие при изменении числа включенных осветительных приборов возможность получить различные цветовые переходы и этим значительно разнообразить цветовые эффекты.

Разнообразие в вечернюю картину города вносит освещенная зелень, в обилии имеющаяся в парках и скверах. Однако освещение зелени с помощью светильников наружного освещения, особенно с лампами накаливания, не дает особого эффекта, поскольку в их спектре преобладают красные, оранжевые и желтые излучения, которые в значительной степени поглощаются листвой.

Говоря об освещении зелени, мы имеем в виду освещение ее ртутными лампами, в спектре которых большое место занимают зеленые излучения, хорошо отражаемые листвой, придающие ей яркую зеленую окраску и свежесть.

Осветительные приборы с ртутными лампами, в которых предусмотрена защита от попадания внутрь них атмосферных осадков, размещаются на земле или в траншеях и на других неслож-

ных конструкциях с таким расчетом, чтобы ртутные лампы не просматривались с пешеходных дорожек.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Вопросы, затронутые в этой книге, могли бы быть изложены с гораздо большей полнотой. Однако это не входило в задачу автора. Читатель, который глубже заинтересуется цветоведением и связанными с ним проблемами, может ознакомиться со специальной литературой, указанной в конце книги.

Приведенные в книге области использования цвета отнюдь не исчерпывают всех возможных его применений. Цвет находит широкое применение в изобразительном искусстве (живопись, графика, скульптура), в архитектуре, быту и др.

Когда мы слушаем музыку, у нас возникают также и образы природы и создается определенное эмоциональное настроение. Природа и многие окружающие нас предметы окрашены в тот или иной цвет или многокрасочны. Таким образом, совершенно закономерным является желание сочетать музыку и цвет, т. е. осуществить сопровождение музыки цветом. Подобные опыты уже проводились в прошлом столетии и первые три десятилетия двадцатого века характеризовались большим количеством работ в этой области. Работы ведутся и в настоящее время. Цветомузыка — это еще один пример использования цвета в искусстве.

Основные положения цветоведения широко применяются для решения многих практических и теоретических задач, и это еще раз подчеркивает важность широкого внедрения этой науки в различные области техники, в производство, в искусство и другие направления жизни и деятельности людей.